

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

FERNANDO ROSEMANN

**RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE ALVENARIA
ESTRUTURAL DE BLOCOS CERÂMICOS PELO CRITÉRIO
DE ISOLAMENTO TÉRMICO**

FLORIANÓPOLIS

2011

FERNANDO ROSEMANN

**RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE ALVENARIA
ESTRUTURAL DE BLOCOS CERÂMICOS PELO CRITÉRIO
DE ISOLAMENTO TÉRMICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos de obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof.^ª Dr.^a Poliana Dias de Moraes
Co-orientador: Prof. Dr. Humberto Ramos Roman

FLORIANÓPOLIS

2011

FERNANDO ROSEMANN

**RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES DE ALVENARIA
ESTRUTURAL DE BLOCOS CERÂMICOS PELO CRITÉRIO
DE ISOLAMENTO TÉRMICO**

Esta Dissertação foi julgada adequada e aprovada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, agosto de 2011.

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Ph.D.
Coordenador do Programa

Prof^a. Poliana Dias de Moraes, Dr^a
Orientadora – PPGEC/UFSC

Prof. Humberto Ramos Roman, Ph.D.
Coorientador – PPGEC/UFSC

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Armando Lopes Moreno Júnior, Dr.
FEC/UNICAMP

Prof. João Carlos Souza, Dr
ARQ/UFSC

Prof^a. Henriette Lebre La Rovere, Ph.D.
PPGEC/UFSC

À amada esposa, Lubiana,
e aos meus pais, Lindomar e Lia,
pelo amor e pela paciência.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Senhor e Salvador, Jesus Cristo.

À minha esposa Lubiana, pelo amor, paciência, incentivo, apoio e compreensão infinitos.

Aos meus pais, Lindomar e Lia, por uma vida inteira de amor e dedicação incondicionais.

À Prof^a. Poliana Dias de Moraes, pelos ensinamentos, pela confiança e pela excelente orientação, com disponibilidade e paciência.

Ao Prof. Humberto Ramos Roman, pela oportunidade, apoio e amizade demonstrados.

Ao Instituto Euvaldo Lodi de Santa Catarina, à FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos, à Cerâmica Constrular e à Edificaz Tecnologia, pelo apoio técnico e financeiro à pesquisa.

Aos familiares, amigos e colegas de trabalho, por sempre acreditarem em minha capacidade.

RESUMO

No presente trabalho, foi desenvolvido um estudo sobre a resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural construídas com blocos cerâmicos, por meio de métodos experimentais e analítico-numéricos, considerando-se apenas o critério de isolamento térmico. Na parte experimental, foram realizados ensaios segundo a NBR 5628 para a determinação da resistência ao fogo, que consistiram na construção de 4 corpos de prova não carregados com dimensões de 2,70 m × 2,60 m, utilizando blocos cerâmicos de dimensões 14 cm × 19 cm × 29 cm e resistência mecânica à compressão de 9 N/mm², alternando a presença de revestimentos de argamassa e o preenchimento dos vazados com areia, com a aplicação de aquecimento controlado em uma das faces. Na parte analítica-numérica, foram utilizados 2 métodos para a determinação da resistência ao fogo: o método analítico do Brick Industry Association, baseado na espessura equivalente da parede, e o método dos elementos finitos, com o auxílio do programa CAST3M, utilizando um modelo calibrado, desprezando-se a convecção e radiação no interior dos vazados dos blocos. As paredes sem revestimento e sem preenchimento nos vazados apresentaram resistência ao fogo de 106 minutos. Com a aplicação de revestimentos de argamassa nas faces da parede, obteve-se aumento de 80% na resistência ao fogo, e, com o preenchimento com areia nos vazados principais dos blocos, o acréscimo verificado foi de 100%. Os resultados obtidos nos ensaios comprovaram o bom desempenho ao fogo das paredes de alvenaria com blocos cerâmicos. Também mostraram que o emprego de revestimentos nas faces e o preenchimento dos vazados representam boas alternativas para aumentar a resistência ao fogo, a um custo relativamente baixo. O método de cálculo do Brick Industry Association apresentou valores 25% inferiores aos resultados experimentais. No entanto, devido à sua simplicidade, o método mostrou-se adequado para uma estimativa da resistência ao fogo de uma parede. Já o método de elementos finitos conseguiu reproduzir a transferência de calor através das paredes, mediante a calibração de um modelo, o qual forneceu resultados muito próximos aos experimentais, mostrando ser uma boa alternativa em substituição aos ensaios.

Palavras-chave: blocos cerâmicos, alvenaria estrutural, resistência ao fogo, isolamento térmico, elementos finitos.

ABSTRACT

This work deals with a study of the fire strength of clay structural blockwork, using experimental and calculation methods, considering only the thermal insulation criteria. The experimental program about the fire resistance tests was carried out according to Brazilian Standard 5628. Four specimens walls were made with the dimensions of 2,70 m long and 2,60 m high. The blocks used measured 14 cm \times 19 cm \times 29 cm and presented a compressive strength of 9 N/mm². Some specimens were made with plaster rendering or sand filling in the hollows of the blocks. The analytical-numerical study was carried out using two different methods to determinate the fire resistance: the Brick Industry Association method, based on the equivalent thickness of the wall, and the finite element method, using the software CAST3M to solve a calibrated model which did not considered convection and radiation within the hollow of the blocks. The walls without rendering and with empty hollows showed fire resistance of 106 minutes. With cement, lime and sand mortar rendering in both faces of the wall, it was detected a 80% increase in fire resistance, and with sand filling in the hollows of the blocks, the increase observed was of about 100%. The test results showed the good fire performance of clay blocks masonry walls. The application of mortar renderings and sand filling revealed to be good low cost alternatives to provide a large increase in fire resistance. The method proposed by the Brick Industry Association provided results 25% lower than the experimental results. However, due to its simplicity, it was adequate to estimate the fire strength of a clay structural blockwork. The finite element method allowed establishing a calibrated model, which provided fire resistance results very similar to the experimental results, proving to be a good alternative to replace the tests.

Keywords: clay block, structural blockwork, fire resistance, thermal insulation, finite elements.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivos gerais	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 LIMITAÇÕES.....	4
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	4
 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	 7
2.1 A SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS EM EDIFICAÇÕES	7
2.1.1 Conceitos de fogo e incêndio	7
2.1.2 Medidas de segurança contra incêndios	10
2.1.3 Compartimentação horizontal e vertical.....	11
2.1.4 Resistência ao fogo das paredes de alvenaria.....	12
2.1.5 Regulamentação da resistência ao fogo	14
2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM PAREDES EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	16
2.2.1 Comportamento das paredes em situação de incêndio	16
2.2.2 Equações da transferência de calor	19
2.2.3 Propriedades termofísicas dos materiais.....	23
2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO AO FOGO DE PAREDES DE ALVENARIA	27
2.3.1 Material do bloco de assentamento.....	28
2.3.2 Geometria do bloco de assentamento	29
2.3.3 Processo construtivo.....	30
2.3.4 Estabilidade estrutural.....	31
2.4 MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO FOGO.....	33
2.4.1 Métodos experimentais de determinação da resistência ao fogo	33
2.4.2 Métodos de cálculo da resistência ao fogo.....	40
 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	 49
3.1 MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1.1 Materiais	49
3.1.2 Amostras e corpos-de-prova.....	50
3.1.3 Disposição das paredes.....	52
3.1.4 Instrumentação dos ensaios	55

3.1.5 Processo de aquecimento	58
3.1.6 Critérios para a determinação da resistência ao fogo	59
3.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
3.2.1 Parede sem preenchimento e sem revestimento	59
3.2.2 Parede sem preenchimento e com revestimento	64
3.2.3 Parede com preenchimento e sem revestimento	67
3.2.4 Parede com preenchimento e com revestimento	71
3.2.5 Análise comparativa do desempenho térmico das paredes	75
3.3 CONCLUSÕES PARCIAIS	76
 4. PROGRAMA NUMÉRICO-ANALÍTICO.....	 79
4.1 MÉTODO DO BRICK INDUSTRY ASSOCIATION	79
4.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	79
4.2.1 Hipóteses simplificadoras	80
4.2.2 Configurações geométricas adotadas	81
4.2.3 Calibração do modelo numérico	84
4.2.4 Análise paramétrica da transferência de calor.....	85
4.2.5 Propriedades termofísicas utilizadas na modelagem	89
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
4.3.1 Método do Brick Industry Association.....	93
4.3.2 Método dos elementos finitos	95
4.3.3 Análise comparativa do desempenho térmico das paredes ..	100
4.3.4 Análise paramétrica da camada de revestimento.....	109
4.4 CONCLUSÕES PARCIAIS	110
 5. CONCLUSÕES FINAIS.....	 113
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	 115
 APÊNDICES	 123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condutividade térmica de materiais cerâmicos.	23
Tabela 2 – Calor específico de materiais cerâmicos.	25
Tabela 3 – Comparação das exigências realizadas pelas normas ASTM E 119, ISO 834 e NBR 5628.	35
Tabela 4 – Pontos determinantes recomendados pela norma ASTM E119.	37
Tabela 5 – Tempo de resistência ao fogo de paredes de alvenaria cerâmica.	43
Tabela 6 – Propriedades termofísicas da cerâmica e da argamassa para as paredes sem preenchimento dos vazados.	90
Tabela 7 – Propriedades termofísicas da cerâmica e da argamassa para as paredes com preenchimento dos vazados.	91
Tabela 8 – Propriedades termofísicas da areia.	92
Tabela 9 – Comparação entre os resultados experimentais e analíticos.	94
Tabela 10 – Comparação dos resultados experimentais e numéricos.	99
Tabela 11 - Ensaios de resistência à compressão da argamassa.	123
Tabela 12 - Ensaio de granulometria da areia.	125
Tabela 13 - Temperaturas no interior do forno durante o ensaio das paredes sem preenchimento.	127
Tabela 14 - Temperaturas no interior do forno durante o ensaio das paredes com preenchimento.	128
Tabela 15 - Temperatura na face não exposta ao fogo da parede sem revestimento e sem preenchimento.	131
Tabela 16 - Temperatura na face não exposta ao fogo da parede com revestimento e sem preenchimento.	132
Tabela 17 - Temperatura na face não exposta ao fogo da parede sem revestimento e com preenchimento.	133
Tabela 18 - Temperatura na face não exposta ao fogo da parede com revestimento e com preenchimento.	135

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tetraedro do Fogo (SEITO, 2008).....	8
Figura 2 – Curva típica de desenvolvimento de um incêndio.	9
Figura 3 – Esquema da transferência de calor em uma parede submetida a incêndio.	17
Figura 4 – Distribuição de temperatura ao longo da espessura da parede.	18
Figura 5 – Volume de controle infinitesimal $dx \, dy \, dz$ para análise da transferência de calor (INCROPERA; DEWITT, 1992).	19
Figura 6 – Condutividade térmica para blocos cerâmicos e blocos de concreto (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005).	24
Figura 7 – Calor específico para blocos cerâmicos e blocos de concreto (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005).....	26
Figura 8 – Curvas padronizadas das normas ISO 834 e ASTM E119...	37
Figura 9 – Curvas padronizadas das normas ISO 834 e EN 1991-1-2..	39
Figura 10 – Curvas de incêndio natural (tracejada) e parametrizada (contínua) (SILVA <i>et al</i> , 2008).	40
Figura 11 – Resistência ao fogo de paredes de blocos cerâmicos vazados em função da espessura equivalente.....	44
Figura 12 – Bloco cerâmico estrutural de 14 cm × 19 cm × 29 cm.....	50
Figura 13 – Detalhe parede sem preenchimento e sem revestimento. ...	51
Figura 14 – Detalhe parede sem preenchimento e com revestimento. ..	51
Figura 15 – Detalhe parede com preenchimento e sem revestimento. ..	52
Figura 16 – Detalhe parede com preenchimento e com revestimento.. ..	52
Figura 17 – Disposição das paredes sem preenchimento, em planta....	53
Figura 18 – Disposição das paredes com preenchimento, em planta. ...	53
Figura 19 – Posicionamento em planta dos queimadores.....	54
Figura 20 – Queimador a gás.	54
Figura 21 – Botijões de GLP com registro.	55
Figura 22 – Termopar para registro da temperatura no interior do forno.	55
Figura 23 – Deprimômetro.	56

Figura 24 - Vista frontal e corte transversal do forno, com unidades em cm.....	57
Figura 25 - Temperatura no interior do forno para as paredes sem preenchimento.....	60
Figura 26 - Curva do aumento de temperatura na face não exposta da parede sem revestimento e sem preenchimento.	61
Figura 27 - Parede sem revestimento e sem preenchimento no início do ensaio.	62
Figura 28 - Parede sem revestimento e sem preenchimento ao final do ensaio.	62
Figura 29 - Principal fissura ocorrida no ensaio.	63
Figura 30 - Curva do aumento de temperatura na face não exposta da parede com revestimento e sem preenchimento.	64
Figura 31 - Parede com revestimento no início da fissuração.....	65
Figura 32 - Parede com revestimento ao final do ensaio, mostrando a localização da principal fissura.	66
Figura 33 - Temperatura no interior do forno para as paredes com preenchimento.....	68
Figura 34 - Curvas do aumento de temperatura na face não exposta da parede sem revestimento e com preenchimento.....	68
Figura 35 - Parede com preenchimento durante a exposição ao fogo...	70
Figura 36 - Curva do aumento de temperatura na face não exposta da parede com revestimento e com preenchimento.	71
Figura 37 - Parede com revestimento e com preenchimento no início do ensaio.	72
Figura 38 - Parede com revestimento e com preenchimento ao final do ensaio, com a localização da principal fissura.	73
Figura 39 - Detalhe da principal fissura ocorrida na parede com revestimento e com preenchimento.....	73
Figura 40 - Temperatura na face não exposta das paredes obtida em ensaios.....	75
Figura 41 – Esquema da transferência de calor em uma parede submetida a incêndio.....	81
Figura 42 – Estudo de refinamento de malha.....	82

Figura 43 - Malha representando a parede sem revestimento e sem preenchimento.	83
Figura 44 - Malha representando a parede com revestimento em ambas as faces.	83
Figura 45 - Malha representando a parede com preenchimento com areia.	84
Figura 46 - Malha representando a parede com revestimento e com preenchimento.	84
Figura 47 - Evolução de temperatura para diferentes condutividades térmicas.	86
Figura 48 - Resistência ao fogo pelo isolamento térmico em função da condutividade térmica.	87
Figura 49 - Evolução de temperatura para diferentes valores de calor específico.	87
Figura 50 - Resistência ao fogo pelo isolamento térmico em função do calor específico.	88
Figura 51 - Evolução de temperatura para diferentes valores de massa específica.	89
Figura 52 - Resistência ao fogo pelo isolamento térmico em função da massa específica.	89
Figura 53 - Curvas do aumento de temperatura na face não exposta do bloco sem revestimento e sem preenchimento.	96
Figura 54 - Curvas do aumento de temperatura na face não exposta do bloco com revestimento e sem preenchimento.	97
Figura 55 - Curvas do aumento de temperatura na face não exposta do bloco sem revestimento e com preenchimento.	98
Figura 56 - Curvas do aumento de temperatura na face não exposta do bloco com revestimento e com preenchimento.	98
Figura 57 - Temperatura da face não exposta dos blocos obtida pelo MEF.	100
Figura 58 - Aumento de temperatura ao longo da linha média do bloco representando a parede sem revestimento e sem preenchimento.	102
Figura 59 - Aumento de temperatura ao longo da linha média do bloco representando a parede com revestimento e sem preenchimento.	102

Figura 60 - Aumento de temperatura ao longo da linha média do bloco representando a parede sem revestimento e com preenchimento.	103
Figura 61 - Aumento de temperatura ao longo da linha média do bloco representando a parede com revestimento e com preenchimento.	104
Figura 62 - Campo de temperaturas do bloco sem revestimento e sem preenchimento.	105
Figura 63 - Campo de temperaturas do bloco com revestimento e sem preenchimento.	106
Figura 64 - Campo de temperaturas do bloco sem revestimento e com preenchimento.	107
Figura 65 - Campo de temperaturas do bloco com revestimento e com preenchimento.	108
Figura 66 - Evolução de temperatura para diferentes espessuras da camada de revestimento.	109
Figura 67 - Resistência ao fogo em função da espessura da camada de revestimento.	110
Figura 68 - Curva granulométrica da areia.	125

1. INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

O crescimento urbano ocorrido no Brasil nas últimas décadas, com seu conseqüente aumento na demanda por moradias, gerou, em praticamente todas as cidades brasileiras, um grande déficit habitacional. Na tentativa de amenizar este déficit, diversas técnicas construtivas, dentre elas a alvenaria estrutural, foram lançadas no mercado desde então (ALMEIDA, 2002).

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo racionalizado, no qual os elementos que desempenham a função estrutural são também os elementos de vedação, constituídos pela alvenaria (VILLAR, 2005).

O sistema construtivo em alvenaria estrutural é utilizado desde a antiguidade por praticamente todas as civilizações, tendo se constituído na principal técnica construtiva empregada até o início do século XX (VILLAR, 2005). Contudo, desde então, a alvenaria estrutural perdeu espaço para as construções em concreto armado e em aço, devido ao desenvolvimento de estudos com estes materiais, que possibilitou a construção de estruturas mais leves, mais esbeltas e melhor compreendidas tecnicamente (CARVALHO, 2007; RAZENTE, 2004).

A retomada da utilização da alvenaria estrutural deu-se a partir da década de 1950, intensificando-se as pesquisas na área, com a criação ou revisão das normas técnicas em vários países e com a disseminação desse conhecimento dentro das universidades. Em 1951, na Suíça, o engenheiro Paul Haller, após ensaios com paredes em escala natural, dimensionou e construiu o primeiro edifício em alvenaria estrutural não-armada, com 13 pavimentos (CARVALHO, 2007).

No Brasil, a alvenaria estrutural voltou a ser utilizada a partir das décadas de 60 e 70, com a utilização dos blocos sílico-calcários e com o surgimento das indústrias de blocos estruturais de concreto e, posteriormente, dos cerâmicos (CARVALHO, 2007).

Por muitos anos, porém, a alvenaria estrutural permaneceu pouco utilizada, devido a fatores como: preconceito dos construtores e dos consumidores, maior domínio da tecnologia do concreto armado por parte de construtores e projetistas, pouca divulgação do assunto nas universidades durante o processo de formação do profissional de

Engenharia, além da baixa qualidade e confiabilidade dos produtos cerâmicos até então fabricados (CARVALHO, 2003; RAZENTE, 2004).

Contudo, esta situação se modificou. A alvenaria estrutural vem se consolidando como sistema construtivo viável, moderno e econômico. Entre os motivos, pode-se citar a racionalização proveniente do sistema construtivo, resultando em obras mais econômicas, elemento de grande importância num período de retração econômica no setor habitacional do país (ARANTES; CAVALHEIRO, 2004).

Outro fator que contribuiu para a consolidação da alvenaria estrutural foi o esforço contínuo de estudo e pesquisa realizados por parte das universidades, possibilitando a disseminação de novos conhecimentos ao mercado da construção (CARVALHO, 2007; MENDES, 1998).

A utilização do bloco cerâmico como unidade de assentamento da alvenaria estrutural tem aumentado desde meados da década de 80. Tal fato se deve à produção de blocos cerâmicos de melhor qualidade, de maior resistência e de melhor perfeição dimensional, o que permitiu o uso deste material com funções estruturais (ROMAN, 1991).

A cerâmica possui uma série de características que a fazem um dos materiais de construção mais utilizados no mundo todo, tais como a resistência, a durabilidade, o isolamento térmico e acústico. Também apresenta bom desempenho ao fogo, pois é um material incombustível, não propaga chamas e não produz fumaça ou gases tóxicos durante o incêndio (ROMAN, 1991).

Como os blocos cerâmicos possuem bom desempenho ao fogo, logicamente, espera-se que uma parede construída com tais blocos também possua boa resistência ao fogo, que, segundo a NBR 14432 (ABNT, 2001), pode ser definida como a propriedade de um elemento de construção de resistir à ação do fogo por determinado período de tempo, mantendo sua segurança estrutural, estanqueidade e isolamento, onde aplicável.

A resistência ao fogo das paredes de uma edificação é muito importante para a segurança contra incêndios, uma vez que, em incêndios ocorridos em edifícios de grande altura, constatou-se que as vias de circulação apresentavam uma grande vulnerabilidade à fumaça, ao calor e às chamas, o que dificultava o abandono da edificação e permitia ao incêndio propagar-se rapidamente (ONO, 2007).

Como apresenta boa resistência ao fogo e não produz fumaça ou gases tóxicos, uma parede de alvenaria com blocos cerâmicos torna-se uma boa alternativa para minimizar a propagação do incêndio,

proporcionando tanto o isolamento térmico e quanto a estabilidade necessários ao edifício (OLIVEIRA, 1998). Entretanto, foram encontrados poucos estudos sobre a resistência ao fogo de paredes de alvenaria com blocos cerâmicos, os quais envolveram somente paredes com 14 cm de espessura (CHICHERCHIO, 1990; THOMAZ; HELENE, 2000).

Devido à falta de informações técnicas sobre esse assunto, este trabalho de mestrado visa estudar a resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural, construídas com blocos cerâmicos de dimensões de 14 cm × 19 cm × 29 cm, com resistência mecânica à compressão de 9 N/mm², por meio de ensaios e de métodos de cálculo analíticos e numéricos, procurando identificar os principais fatores que influenciam o desempenho ao fogo das alvenarias. Deste modo, os blocos cerâmicos terão suas propriedades melhor conhecidas, podendo ser utilizados explorando todas as suas potencialidades.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Estudar a resistência ao fogo, pelo critério de isolamento térmico, de paredes de alvenaria estrutural construídas com blocos cerâmicos, por meio de ensaios e de métodos de cálculo.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- avaliar experimentalmente o comportamento de paredes de alvenaria construídas com blocos cerâmicos em ensaios normatizados de resistência ao fogo;
- identificar os principais fatores que influenciam o desempenho ao fogo das alvenarias, tais como o tipo de bloco e o sistema construtivo utilizado;
- avaliar a variação de resistência ao fogo obtido com o preenchimento dos vazados internos dos blocos;

- avaliar a influência de revestimentos de argamassa mista de cimento, cal e areia na resistência ao fogo;
- verificar a adequação dos métodos de cálculo analíticos e numéricos utilizados para a determinação da resistência ao fogo das paredes de blocos cerâmicos.

1.3 LIMITAÇÕES

Esta pesquisa restringe-se, exclusivamente, a paredes de alvenaria executadas com blocos cerâmicos estruturais, assentados com juntas de argamassa horizontais e verticais.

Foi verificada apenas a influência do revestimento de argamassa mista de cimento, cal e areia, em ambas as faces da parede, assim como o preenchimento dos vazados principais dos blocos com areia, na resistência ao fogo das paredes.

Somente uma amostra de cada configuração de parede foi submetida ao ensaio de resistência ao fogo, o que faz com que os resultados obtidos não sejam definitivamente conclusivos. Sabe-se que, para se ter um estudo estatisticamente representativo, seriam necessárias várias replicações do ensaio, as quais não foram feitas devidas ao alto custo e complexidade do ensaio.

Os ensaios foram realizados sem que as amostras das paredes fossem carregadas, fazendo com que a verificação dos requisitos de resistência mecânica e de estanqueidade da parede ficasse prejudicada. Desse modo, os resultados obtidos nos ensaios de resistência ao fogo correspondem apenas ao atendimento do requisito de isolamento térmico das paredes.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. No Capítulo 1, são apresentados a justificativa, o objetivo geral, os objetivos específicos e as limitações do estudo.

O Capítulo 2 aborda a revisão bibliográfica efetuada sobre o tema, abrangendo a segurança contra incêndios, a resistência ao fogo das paredes de alvenaria, os principais fatores que a influenciam, e os

métodos experimentais e de cálculo para a determinação dessa resistência.

Em seguida, no Capítulo 3, aborda-se o programa experimental desenvolvido na pesquisa, descrevendo os materiais e métodos utilizados nos ensaios de resistência ao fogo, apresentando e discutindo os resultados obtidos e efetuando as conclusões parciais.

O Capítulo 4 é dedicado aos métodos de cálculo analíticos e numéricos da resistência ao fogo, descrevendo as considerações efetuadas, apresentando os resultados verificados e destacando as conclusões parciais obtidas.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais do trabalho e as recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS EM EDIFICAÇÕES

Os incêndios são uma força destrutiva que causa milhares de mortes e enormes perdas materiais todos os anos ao redor do mundo. Eles podem ocorrer em qualquer tipo de edificação, representando um desafio à segurança humana, desafio este que aumenta na proporção em que mais pessoas vivem e trabalham em edifícios cada vez maiores ao redor do mundo.

Contudo, apesar de sua importância, foi apenas a partir da década de 1970 que a área de segurança contra incêndios em edificações desenvolveu-se no Brasil, após a ocorrência de dois incêndios de grandes proporções na cidade de São Paulo, no Edifício Andraus e no Edifício Joelma, este último vitimando 179 pessoas (ONO, 2007).

A segurança contra incêndios das edificações é um campo de estudo da Engenharia que tem por objetivo limitar, a níveis aceitáveis, a probabilidade de morte, ferimento e perdas materiais em um incêndio (BUCHANAN, 2002). Este objetivo é alcançado por meio do estabelecimento e da aplicação de uma série de medidas de segurança contra incêndios.

Entretanto, para o estudo das medidas de prevenção e proteção contra incêndios a serem adotadas nas edificações, é necessário anteriormente entender alguns conceitos fundamentais relacionados aos incêndios e como os incêndios se desenvolvem no interior de uma edificação.

2.1.1 Conceitos de fogo e incêndio

De um modo simplificado, a combustão é uma reação química exotérmica que envolve a oxidação de materiais orgânicos, produzindo vapor de água e dióxido de carbono (BUCHANAN, 2002). Já o fogo ocorre quando o processo de oxidação de um material combustível desenvolve-se de forma rápida, sendo caracterizado pela emissão de calor, acompanhado de luz, fumaça, ou ambos (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION – NFPA, 2009).

Para a ocorrência do fogo, são necessários os seguintes componentes: o combustível (a substância que queima), o comburente (o oxigênio), o calor, e a reação em cadeia. Através da reação em cadeia, o calor produzido na reação de combustão é reutilizado, dando continuidade à ocorrência do fogo (SEITO, 2008). Todos estes componentes devem estar presentes para que o fogo se mantenha, sendo que a remoção de apenas um deles faz com o mesmo seja interrompido, conceito que serve de base para os métodos tradicionais de combate ao fogo. Desse modo, pode-se extinguir o fogo retirando o calor, através do resfriamento com água, ou removendo o oxigênio, por abafamento com um cobertor (AREASEG, 2009; NFPA, 2009).

Os meios de extinção do fogo podem ser representados pelo Tetraedro do Fogo (Figura 1). No Tetraedro, cada uma das quatro faces representa um componente essencial do fogo – combustível, comburente, calor e reação em cadeia, ocorrendo a extinção do fogo com a remoção de um de seus componentes (SEITO, 2008).

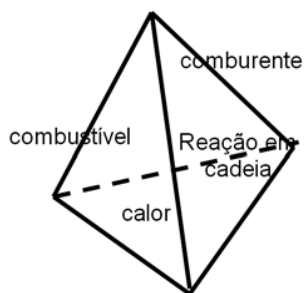


Figura 1 – Tetraedro do Fogo (SEITO, 2008).

O incêndio pode ser caracterizado como uma combustão rápida, que se propaga no tempo e no espaço de forma descontrolada. Tem como produtos resultantes da combustão o calor, a fumaça e a chama (SEITO, 2008).

O desenvolvimento do incêndio depende de vários fatores: da forma e das dimensões do local, da quantidade e da distribuição do material combustível no local do evento, das condições climáticas (temperatura e umidade relativa), das características arquitetônicas do ambiente e das medidas de prevenção e proteção contra incêndio instaladas na edificação (SEITO, 2008).

De modo geral, os incêndios podem apresentar quatro fases distintas: incipiente, crescimento, combustão generalizada e resfriamento, e obedecem a uma curva temperatura-tempo típica em seu processo de desenvolvimento (Figura 2) (BUCHANAN, 2002).

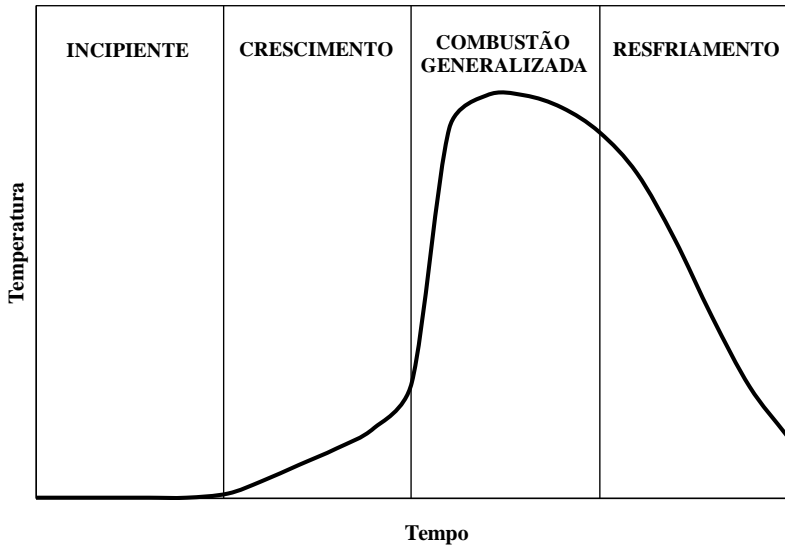


Figura 2 – Curva típica de desenvolvimento de um incêndio.

Na fase incipiente do incêndio, ocorre o aquecimento dos materiais combustíveis, de forma lenta, em geral com duração entre 5 e 20 minutos, até a ignição de uma chama, fato que marca a transição para o período de crescimento do incêndio.

Na fase de crescimento do fogo, as chamas espalham-se pelo ambiente com uma velocidade que aumenta à medida que aumenta o incêndio. Ocorre a propagação do fogo para objetos adjacentes e ou para o material de cobertura da edificação. Caso sejam iniciadas nesta fase, as operações de combate a incêndio têm grande probabilidade de sucesso (BUCHANAN, 2002; SEITO, 2008).

Quando as temperaturas do ambiente atingem cerca de 600 °C, a taxa de combustão dos materiais cresce rapidamente, levando à transição do incêndio para a fase de combustão generalizada do ambiente, também conhecida como *flashover*, onde as temperaturas do ambiente podem atingir valores acima de 1100 °C. É nesta fase que o fogo causa

impacto em elementos estruturais e em elementos separadores de compartimentos (BUCHANAN, 2002; SEITO, 2008).

Caso o incêndio continue, o combustível pode ser queimado até se esgotar totalmente. Com o esgotamento do material combustível, ocorre uma diminuição gradual da temperatura do ambiente e das chamas, caracterizando a fase de resfriamento do incêndio.

2.1.2 Medidas de segurança contra incêndios

Um edifício relativamente seguro contra incêndios é aquele em que há, pelo menos, uma alta probabilidade de que todos os ocupantes sobrevivam a um incêndio sem sofrer nenhum ferimento e de que os danos materiais sejam confinados apenas às vizinhanças imediatas ao local de início do fogo (HARMATHY, 1984).

Para que uma edificação seja capaz de oferecer tal desempenho quando submetida a um incêndio, Mitidieri (2008) estabelece certos requisitos funcionais aos quais a edificação deve atender:

- prevenir o início do incêndio;
- ocorrido o princípio de incêndio, limitar seu crescimento;
- possibilitar a extinção do incêndio no ambiente de origem;
- limitar a propagação do incêndio para outros ambientes;
- permitir a evacuação segura dos usuários do edifício;
- dificultar a propagação do incêndio para edifícios adjacentes;
- manter o edifício íntegro, sem danos, sem ruína parcial ou total; e
- permitir operações de natureza de combate ao fogo e de resgate de vítimas.

Com base nestes requisitos funcionais, são estabelecidas as medidas de segurança contra incêndios, as quais, quando devidamente compatibilizadas e integradas, buscam minimizar os riscos de aparecimento e os danos causados por incêndios.

De forma mais ampla, Hahn (1994) destaca que a finalidade das medidas de segurança contra incêndios é fazer com que, em uma ocorrência de incêndio, as edificações consigam manter o seu desempenho estrutural por um determinado período, a geração e espalhamento de fogo e fumaça sejam limitados, os ocupantes consigam deixar as edificações, e as equipes de resgate tenham segurança para desempenhar as suas funções.

As medidas de segurança contra incêndios podem ser classificadas em medidas de prevenção e de proteção. As medidas de prevenção, como o nome já indica, são aquelas que se destinam a prevenir a ocorrência do início do incêndio, enquanto que as medidas de proteção são aquelas destinadas a resguardar a vida humana e os bens materiais dos efeitos do incêndio em desenvolvimento (ONO, 2007). Por sua vez, as medidas de proteção contra incêndios podem ser classificadas em medidas de proteção passivas e ativas.

As medidas de proteção ativas visam controlar o fogo ou os seus efeitos mediante alguma ação tomada por uma pessoa ou por um equipamento automático. Como exemplos de sistemas ativos, Ono (2007) destaca os sistemas de extinção manual (hidrantes e mangotes) e automática (chuveiros automáticos), os equipamentos portáteis (extintores de incêndio), os sistemas de alarme e detecção e os sistemas de sinalização e iluminação de emergência.

Já as medidas de proteção passivas visam controlar o fogo ou os seus efeitos por sistemas construídos dentro dos elementos do edifício, não requerendo uma operação específica dos mesmos em caso de incêndio (BUCHANAN, 2002). Dentre as medidas de proteção passivas, pode-se citar a compartimentação horizontal e vertical, o controle da quantidade de materiais combustíveis incorporados aos elementos construtivos, a provisão de rotas de fuga seguras e a resistência ao fogo da envoltória do edifício e de seus elementos estruturais (ONO, 2007).

2.1.3 Compartimentação horizontal e vertical

A compartimentação de uma edificação consiste na interposição de elementos de construção resistentes ao fogo, destinados a separar um ou mais locais do restante da edificação, de forma a evitar ou minimizar a propagação do fogo, calor e gases aquecidos (MARCATTI; COELHO FILHO; BERQUÓ FILHO, 2008).

Com a compartimentação, evita-se que pequenos incêndios se tornem incêndios de maiores proporções, os quais possuem um potencial destrutivo muito maior. Também proporciona o abandono seguro dos ocupantes de uma edificação através de rotas de fuga e saídas de emergência, bem como o acesso das equipes de salvamento e combate ao fogo ao interior do edifício (BUCHANAN, 2002).

Desse modo, percebe-se que a compartimentação exerce um papel de fundamental importância na segurança contra incêndios de uma

edificação, conforme destacado por Ono (2007) e pela NWCMA (2005), sendo classificada como uma medida de proteção passiva.

O controle da propagação do incêndio por meio da compartimentação pode ser dividido em duas categorias principais: a compartimentação horizontal e a compartimentação vertical. A compartimentação horizontal é uma medida que evita a propagação do incêndio no plano horizontal, confinando-o ao local de origem (MARCATTI; COELHO FILHO; BERQUÓ FILHO, 2008). Os elementos construtivos que caracterizam a compartimentação horizontal são as paredes divisórias, além das portas corta-fogo, da selagem corta-fogo nas passagens das instalações prediais e dos registros corta-fogo nas tubulações de ventilação e ar-condicionado.

Desde que apresentem as dimensões mínimas necessárias para garantir o isolamento térmico e a estanqueidade, as paredes de alvenaria construídas com blocos cerâmicos podem ser utilizadas como paredes corta-fogo, conseguindo desempenhar de forma satisfatória a função de compartimentação horizontal das edificações (ONO, 2007).

Similarmente, a compartimentação vertical é uma medida de proteção destinada a evitar a propagação do incêndio no plano vertical, para pavimentos adjacentes, constituída por elementos resistentes ao fogo dispostos tanto interna quanto externamente à edificação (MARCATTI; COELHO FILHO; BERQUÓ FILHO, 2008).

Internamente, a função de compartimentação vertical tem sido desempenhada principalmente pelas lajes das edificações, atentando-se para a estanqueidade das mesmas, de forma que todos os vãos e instalações que as atravessam também sejam protegidos por materiais resistentes ao fogo.

No exterior da edificação, o fogo pode propagar-se entre os pavimentos através das janelas externas. Neste sentido, a compartimentação vertical é obtida com a utilização de abas, como marquises e platibandas, de modo a afastar as chamas da parede, dificultando a propagação do fogo.

2.1.4 Resistência ao fogo das paredes de alvenaria

Para que possam exercer a função de compartimentação horizontal em situação de incêndio, as paredes de alvenaria dependem de sua resistência ao fogo. Em termos simplificados, a resistência ao fogo pode ser definida como a propriedade que um elemento construtivo

ou uma combinação destes possui de se opor ao avanço do fogo ou de proteger dele (BUCHANAN, 2002).

No caso de uma parede de alvenaria, a resistência ao fogo compreende três níveis de segurança: adequação estrutural, estanqueidade e isolamento térmico (THINK BRICK AUSTRALIA, 2006). Estes três requisitos estão presentes nas principais normas nacionais e estrangeiras sobre a realização do ensaio para determinação da resistência ao fogo, tais como a NBR 5628 (ABNT, 2001), a NBR 10636 (ABNT, 1989), a ASTM E119 (ASTM, 2008) e a ISO 834 (ISO, 1999). Segundo tais normas, durante a realização dos ensaios, as amostras dos elementos que se deseja testar são submetidas a uma ação térmica padrão, sendo monitorado o atendimento aos requisitos estabelecidos.

A adequação estrutural é a habilidade da parede de preservar sua resistência mecânica de modo a continuar a desempenhar sua função estrutural na edificação durante todo o período de resistência ao fogo. Tal propriedade torna-se ainda mais importante no sistema construtivo em alvenaria estrutural, uma vez que as paredes são responsáveis pela distribuição das cargas e dos esforços até as fundações.

Já a estanqueidade está ligada à capacidade da parede de manter sua continuidade, prevenindo a passagem de chamas e gases quentes através de fissuras que venham a surgir. Também auxilia no controle do espalhamento de fumaça, que é o produto da combustão que mais afeta as pessoas no interior da edificação, uma vez que causa diversos danos à saúde, como lacrimejamento, tosse, sufocação e intoxicação, podendo inclusive levar à morte. Além disso, a presença de fumaça no ambiente diminui a visibilidade, contribuindo para o aumento do pânico (SEITO, 2008).

Por fim, o isolamento térmico é a habilidade da parede de fornecer isolamento suficiente, de forma que o lado da parede oposto ao fogo não exceda um valor predefinido de temperatura durante o período de resistência ao fogo. Deste modo, o isolamento térmico auxilia na proteção à vida dos ocupantes da edificação, além de impedir a propagação do fogo. Geralmente, o isolamento térmico tem sido o parâmetro determinante da resistência ao fogo, ocorrendo antes dos critérios de adequação estrutural e de estanqueidade (BEALL, 1994).

O desempenho ao fogo das paredes de alvenaria depende das características físicas dos materiais, tais como a condutibilidade térmica e a porosidade, das características construtivas das paredes, como o peso próprio e as juntas de assentamento, além das características estruturais,

como a esbeltez e as restrições existentes (THOMAZ; HELENE, 2000). A influência destes fatores na resistência ao fogo serão apresentados na Seção 2.3.

É importante entender os conceitos de período e de classe de resistência ao fogo. O período de resistência ao fogo é o intervalo de tempo determinado por um teste de resistência ao fogo, ou por um método nele baseado, em que um elemento construtivo continua a desempenhar suas funções exigidas no ensaio.

Por sua vez, a classe de resistência ao fogo é determinada com base em um período de resistência ao fogo, em minutos, sendo usualmente dada em períodos de 30 ou 60 minutos. A classe de resistência ao fogo que um elemento construtivo deve apresentar é estabelecida pelos códigos de edificações (BRICK INDUSTRY ASSOCIATION, 2008).

2.1.5 Regulamentação da resistência ao fogo

Por meio de códigos de edificações e normas técnicas, são estabelecidos os requisitos que devem ser obrigatoriamente apresentados pelos elementos construtivos de um determinado tipo de edificação. Tais requisitos são definidos com base nos princípios de segurança contra incêndios e visam à proteção da vida humana e dos bens materiais (MITIDIERI, 2008).

Para o caso das paredes de alvenaria, os códigos de edificações estabelecem que, para algumas situações, as mesmas apresentem um determinado nível de resistência ao fogo, de forma a proteger os ocupantes da edificação e prover meios de escape e resgate. Este nível de resistência ao fogo exigido é mensurado através do tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF).

De forma simplificada, o tempo requerido de resistência ao fogo pode ser entendido como o tempo mínimo que as paredes de alvenaria devem resistir a uma ação térmica padronizada, em um ensaio laboratorial, continuando a apresentar características de integridade, estanqueidade e isolamento (BONITESE, 2007; OLIVEIRA, 1998; SILVA *et al*, 2008).

Os códigos estabelecem o tempo requerido de resistência ao fogo considerando fatores ligados às características construtivas e ao tipo de utilização da edificação. A NBR 14432 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento (ABNT,

2001) fixa os critérios de resistência ao fogo com base no tipo de ocupação, área, profundidade do subsolo, altura da edificação e facilidade de acesso para combate ao incêndio. Os tempos são estabelecidos entre 30 e 120 minutos, com intervalos de 30 minutos. Outros códigos ainda levam em consideração outros fatores, tais como a quantidade de materiais combustíveis e a presença de sistemas de extinção de fogo (BEALL, 1994; BRICK INDUSTRY ASSOCIATION, 2008; MITIDIERI, 2008).

Para o Estado de Santa Catarina, a regulamentação contra incêndio é efetuada também por meio das Normas de Segurança Contra Incêndios – NSCI, as quais fixam os requisitos mínimos que a edificação e seus elementos construtivos devem apresentar, de acordo com a classificação de ocupação das edificações e os respectivos riscos (SANTA CATARINA, 1992).

As NSCI exigem resistência ao fogo para as paredes de uma edificação quando estas integram dois importantes sistemas de segurança: as saídas de emergência e as paredes corta-fogo.

No caso das saídas de emergência, inicialmente, as NSCI consideram todas as escadas existentes na edificação como tal, classificando-as em 4 tipos diferentes: comum, protegida, enclausurada, e enclausurada à prova de fumaça, estabelecendo o período mínimo de resistência ao fogo das paredes que revestem a saída de emergência entre 2 a 4 horas (SANTA CATARINA, 1992). Há também situações de edificações industriais e comerciais com depósito onde são exigidas paredes corta-fogo pelas NSCI. O tempo de resistência ao fogo exigido para tais paredes varia de 3 a 8 horas, definido em função da classificação de risco e do número de pavimentos da edificação (SANTA CATARINA, 1992). Portanto, para a utilização de uma determinada parede de alvenaria como componente de uma edificação, primeiramente, deve-se verificar quais são as exigências de resistência ao fogo estabelecidas pela regulamentação contra incêndio, para, em seguida, avaliar se a parede de alvenaria atende aos requisitos exigidos. Tal avaliação é normalmente realizada através de métodos detalhados mais adiante.

2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM PAREDES EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Nesta seção, são apresentados os fenômenos envolvidos na transferência de calor entre as faces das paredes de alvenaria quando submetidas a incêndios, dada a importância do isolamento térmico para a resistência ao fogo da parede.

2.2.1 Comportamento das paredes em situação de incêndio

Em uma parede de alvenaria submetida a uma situação de incêndio, devido à diferença de temperatura entre o ambiente onde ocorre o incêndio e o ambiente do lado oposto da parede, ocorrerá a transferência de calor através da parede. Contudo, este é um fenômeno bastante complexo, pois o aquecimento dos materiais constituintes da parede pode acarretar diversas reações químicas endo e exotérmicas, com alterações na constituição das argamassas. Além disso, com a mudança de fase da umidade presente nos materiais, ocorre transporte de massa através do meio poroso parcialmente saturado, afetando a transferência de calor.

A transferência de calor pode ser definida como o trânsito de energia provocado por uma diferença de temperatura num meio, ou entre vários meios (INCROPERA; DEWITT, 1992; BUCHANAN, 2002). Em situação de incêndio, a transmissão de calor através da parede de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos pode ocorrer pelos processos de condução, convecção e radiação, de acordo com a camada da parede atravessada, sendo um fenômeno transiente, devido à variação das condições de contorno e do campo de temperatura no interior do material ao longo do tempo (Figura 3).

Primeiramente, com o início do fogo, a temperatura dos gases no interior do compartimento submetido ao incêndio irá aumentar, apresentando uma temperatura $T_{\infty I}$, superior à temperatura da superfície da parede exposta à ação do fogo T_{SI} , ocorrendo a transferência de calor por convecção e radiação do ar aquecido no interior do compartimento para a face da parede (NGUYEN *et al.*, 2009). Com a elevação da temperatura da superfície da face exposta ao fogo T_{SI} , haverá uma diferença entre esta e a temperatura da superfície não exposta ao fogo

T_{S2} , que se traduzirá na troca de calor entre as duas superfícies, através dos blocos e demais materiais constituintes da parede.

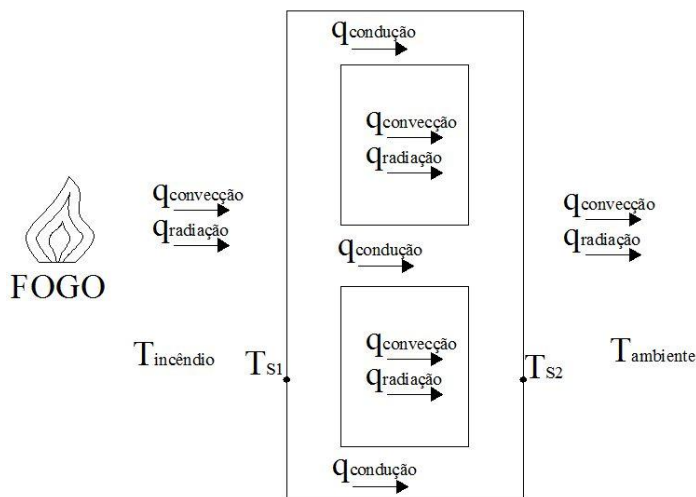


Figura 3 – Esquema da transferência de calor em uma parede submetida a incêndio.

Entretanto, como o bloco estrutural não é maciço, devido à presença de vazados em seu interior, a transferência de calor ocorre de maneiras distintas ao longo dos diferentes materiais da alvenaria. Nas partes maciças dos blocos, a transferência de calor ocorrerá através do mecanismo de condução e, nos vazios, ocorrerá transferência por convecção e por radiação (AL-HADHRAMI; AHMAD, 2008).

Em face às necessidades do projeto da alvenaria estrutural, as cavidades existentes no interior dos blocos podem ser preenchidas com graute, de modo a melhorar a resistência mecânica das paredes. Neste caso, a transferência de calor no interior dos vazados não ocorre mais através dos mecanismos de convecção e radiação, e sim através de condução. Tal consideração também se aplica no caso do preenchimento do interior dos vazados com materiais diversos, como a areia ou materiais de baixa massa específica, com a finalidade de melhorar determinadas características da parede, tais como o isolamento acústico, o isolamento térmico ou a resistência ao fogo (BRICK INDUSTRY ASSOCIATION, 2008).

Com a transferência de calor através da parede, a temperatura da face da parede não exposta ao fogo T_{s2} irá aumentar, ficando em um valor superior em relação à temperatura do ar $T_{\infty 2}$. Com isso, haverá perda de calor da superfície para o ar através dos fenômenos de convecção e radiação.

As paredes de alvenaria estrutural, assim como as paredes de alvenaria convencional, geralmente, apresentam camadas de revestimentos de argamassa em ambas as faces, as quais também devem ser atravessadas pelo calor, por meio de condução.

Como a transmissão de calor ocorre em regime transiente, o perfil da distribuição de temperaturas no interior da parede assume uma configuração não linear (Figura 4), conforme foi constatado em ensaios de resistência ao fogo realizados por diversos autores, com medições da temperatura em diversos pontos ao longo da espessura das paredes (O'CONNOR; SILCOCK; MORRIS, 1995; NADJAI *et al*, 2006; NGUYEN *et al*, 2009).

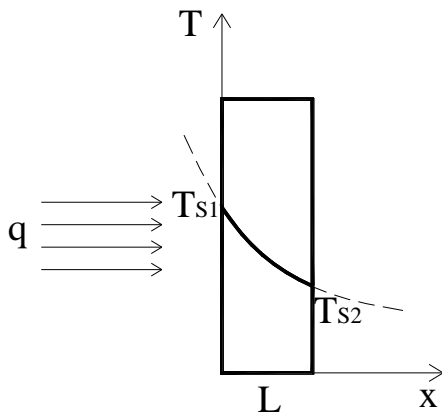


Figura 4 – Distribuição de temperatura ao longo da espessura da parede.

A curva de distribuição de temperatura depende de fatores como a espessura da parede e a taxa de aquecimento a qual a mesma foi submetida. Quanto maior a espessura da parede e quanto maior a taxa de aquecimento aplicada, maior será a concavidade da curva de temperaturas ao longo da parede (NADJAI *et al*, 2006).

2.2.2 Equações da transferência de calor

O fenômeno de transferência de calor pode ser modelado por meio da lei de conservação de energia, expressa na Equação (1). Conforme esta lei, a taxa na qual a energia térmica entra num volume de controle (\dot{E}_{af}), mais a taxa na qual a energia térmica for gerada no interior do volume (\dot{E}_g), menos a taxa na qual a energia térmica sai do volume (\dot{E}_{ef}), é igual a taxa de aumento da energia armazenada no interior do volume de controle (\dot{E}_{ac}) (INCROPERA; DEWITT, 1992).

$$\dot{E}_{af} + \dot{E}_g - \dot{E}_{ef} = \dot{E}_{ac} \quad (1)$$

Para a aplicação da lei de conservação de energia, inicialmente, considera-se um meio homogêneo em que existem gradientes de temperatura e em que a distribuição de temperatura $T(x,y,z)$ está expressa em coordenadas cartesianas. Neste meio, define-se um volume de controle infinitesimalmente pequeno (diferencial), $dx \, dy \, dz$, conforme a Figura 5 (INCROPERA; DEWITT, 1992).

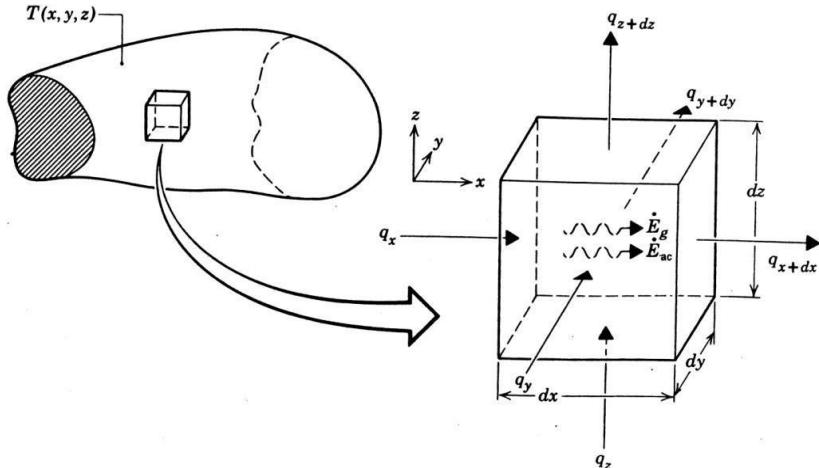


Figura 5 – Volume de controle infinitesimal $dx \, dy \, dz$ para análise da transferência de calor (INCROPERA; DEWITT, 1992).

Como existem gradientes de temperatura em cada uma das superfícies de controle x , y e z , irá ocorrer transferência de calor através das mesmas, cujas taxas de condução de calor são simbolizadas por q_x ,

q_y e q_z , respectivamente. Em cada uma das superfícies opostas, as taxas de condução de calor q_{x+dx} , q_{y+dy} e q_{z+dz} podem ser expressas pelas Equações (2), (3) e (4).

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (2)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad (3)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (4)$$

No caso de haver uma fonte de energia no interior do meio, a taxa de geração de energia pode ser calculada pela Equação (5).

$$\dot{E}_g = \dot{q} dx dy dz \quad , \quad (5)$$

onde: \dot{q} = taxa de geração de energia por unidade de volume (W/m^3).

Quando ocorrer modificação na quantidade de energia térmica acumulada pelo material no volume de controle, pode-se exprimir a respectiva taxa por meio da Equação (6).

$$\dot{E}_{ac} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad , \quad (6)$$

onde: ρ = massa específica (kg/m^3); c = calor específico (J/kg.K); T = temperatura (K); t = tempo (s); e $\rho c \partial T / \partial t$ = taxa de variação da energia interna do meio, por unidade de volume, com o tempo.

Substituindo na Equação (1) as Equações (5) e (6) e definindo que as taxas de condução constituem uma entrada de energia (\dot{E}_{af}) e uma saída de energia (\dot{E}_{ef}), obtém-se a Equação (7).

$$\begin{aligned} q_x + q_y + q_z + \dot{q} dx dy dz - q_{x+dx} - q_{y+dy} - q_{z+dz} \\ = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \end{aligned} \quad (7)$$

Substituindo-se as Equações (2), (3) e (4), a Equação (7) toma a forma da Equação (8).

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x}dx - \frac{\partial q_y}{\partial y}dy - \frac{\partial q_z}{\partial z}dz + \dot{q} dx dy dz = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (8)$$

As taxas de condução de calor q_x , q_y e q_z são dadas pelas Equações (9), (10) e (11) (INCROPERA; DEWITT, 1992).

$$q_x = -k dy dz \frac{\partial T}{\partial x} \quad (9)$$

$$q_y = -k dx dz \frac{\partial T}{\partial y} \quad (10)$$

$$q_z = -k dx dy \frac{\partial T}{\partial z} \quad , \quad (11)$$

onde: k = condutividade térmica (W/m.K).

Por fim, substituindo-se as Equações (9), (10) e (11) na Equação (8) e dividindo pelas dimensões do volume de controle (dx , dy e dz), tem-se a Equação (12), chamada de equação da difusão do calor (INCROPERA; DEWITT, 1992).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12)$$

A equação da difusão do calor pode ser aplicada para o cálculo da transmissão de calor de paredes submetidas a incêndios, sendo reescrita na forma compacta expressa na Equação (13) (PIERIN; ROVERE; MORAES, 2009).

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(k \nabla T) = f(t) \quad , \quad (13)$$

onde: $f(t)$ = fonte de calor associada a um incêndio.

Além das equações para a transferência de calor no interior da parede, necessita-se também estudar as equações que tratam do aquecimento da parede na face exposta ao fogo e do resfriamento na

face não exposta ao fogo, as quais ocorrem através dos fenômenos de convecção e radiação.

A transferência de calor por convecção é proporcional à diferença entre as temperaturas da superfície e do fluido. Para o cálculo do fluxo de calor transmitido por convecção utiliza-se a Equação (14).

$$q_c = h_c \cdot (T_S - T_\infty), \quad (14)$$

onde: h_c = coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$); T_S = temperatura da superfície (K); e T_∞ = temperatura do fluido (K).

O coeficiente de transferência convectiva de calor h_c depende de parâmetros tais como a geometria da superfície, a natureza do movimento do fluido, e as propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido. Conforme a natureza do movimento do fluido, a convecção pode ser classificada como livre ou forçada, as quais possuem equações específicas, permitindo obter os valores adequados para o coeficiente h_c .

De um modo geral, os valores do coeficiente de h_c para convecção livre, em gases, situam-se entre 2 e 25 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$. Já no caso de convecção forçada, em gases, a faixa de valores fica entre 25 e 250 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ (INCROPERA; DEWITT, 1992).

Por fim, o fluxo de calor transmitido por radiação entre uma superfície e um fluido em contato com a mesma é determinado pela Equação (15).

$$q_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_S^4 - T_\infty^4), \quad (15)$$

onde: ε = emissividade; σ = constante de Stefan-Boltzmann, igual a $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$; T_S = temperatura da superfície (K); e T_∞ = temperatura do fluido (K).

A emissividade ε é uma propriedade característica de cada superfície, estando compreendida entre os valores 0 e 1, indicando a eficiência de emissão da superfície, em comparação com um radiador ideal. Para materiais cerâmicos e argamassas, os valores de emissividade situam-se entre 0,85 e 0,95 (LAMBERTS *et al*, 2007).

2.2.3 Propriedades termofísicas dos materiais

Uma das principais propriedades termofísicas dos materiais utilizados é a condutividade térmica. A condutividade térmica (k) indica a capacidade do material de transportar calor. Ela representa a taxa de calor transferida ao longo da espessura de material por unidade de diferença de temperatura, e é expressa em W/m.K, no sistema internacional de medidas (INCROPERA; DEWITT, 1992).

Para tijolos e blocos cerâmicos utilizados em alvenaria, os valores de condutividade térmica relatados na literatura, para materiais secos e em temperatura ambiente (20 °C), situam-se em uma faixa entre 0,35 e 2,00 W/m.K (ZSEMBERY; CLARKE; MCNEILLY, 2006; AL NAHHAS *et al*, 2007), conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Condutividade térmica de materiais cerâmicos.

Cond. Térmica (W/m.K)	Descrição	Origem	Autor
0,35 a 1,11	Tijolo comum	Austrália	Zsemary, 2006
0,52	Tijolo comum	EUA	Incropera; Dewitt, 2002
0,69	Tijolo comum	Inglaterra	Buchanan, 2002
0,70 a 1,05	Tijolo comum	Brasil	Lamberts, 1997
0,72	Tijolo vazado esp. 10 cm	EUA	Incropera; Dewitt, 2002
1,00	Bloco vazado esp. 14 cm	Brasil	Chichierchio, 1990
1,08	Tijolo comum	Brasil	Pinto, 2006
1,27	Tijolo vazado 10×30×57 cm	França	Nguyen <i>et al</i> , 2009
2,00	Bloco vazado 19,7×19,7×49 cm	França	Al Nahhas <i>et al</i> , 2007

Entretanto, a condutividade térmica de um material depende de vários fatores, principalmente a temperatura em que o material se encontra, conforme verificado em diversos trabalhos (EN 1996-1-2; NGUYEN *et al*, 2009; PADILHA, 1997; PINTO *et al*, 2006).

A Figura 6 contém os gráficos fornecidos pela EN 1996-1-2 - Design of masonry structures - Part 1-2: General rules - Structural fire

design, em seu Anexo D, que indicam a variação da condutividade térmica em função da temperatura, para blocos cerâmicos e para blocos de concreto (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005).

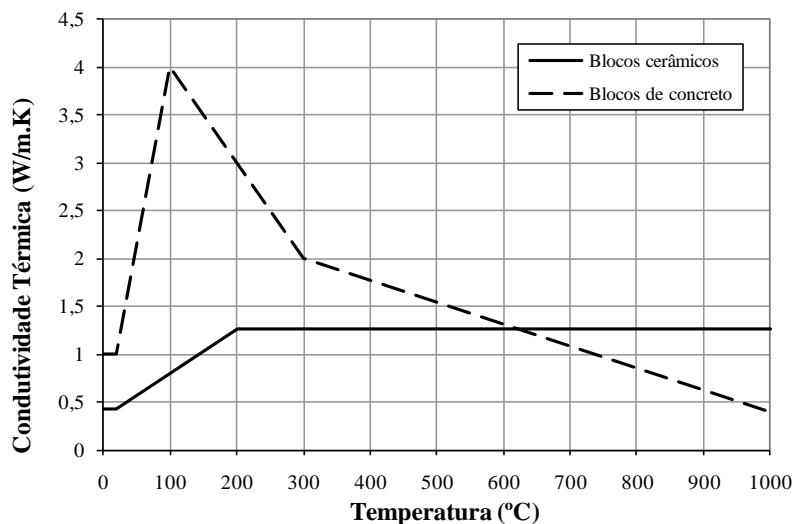


Figura 6 – Condutividade térmica para blocos cerâmicos e blocos de concreto (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005).

Em alguns estudos da condutividade térmica de blocos cerâmicos, verificou-se que a condutividade permanece praticamente constante até a temperatura de 300 °C, quando então inicia uma fase de decaimento, na qual sofre uma perda superior a 50% de seu valor a temperatura ambiente (NGUYEN *et al*, 2009). Em sentido contrário, outros estudos mostraram que a condutividade térmica aumenta com a elevação da temperatura (PINTO *et al*, 2006).

No caso de materiais porosos, como a cerâmica e os produtos de cimento, além da temperatura, a condutividade térmica também sofre a influência do teor de umidade presente nos poros do material, aumentando conforme o aumento da umidade. Mendes *et al* (2001) mostraram resultados de ensaios de condutividade térmica realizados com tijolos cerâmicos e argamassas, tanto com o material seco quanto com o material saturado. Nestes ensaios, a condutividade térmica do tijolo cerâmico seco era de 0,98, e quando saturado era de 2,08 W/m.K.

Para uma argamassa com porosidade de 31%, a condutividade da argamassa seca era de 0,70, e quando saturada era de 2,95 W/m.K. Já para outra argamassa com porosidade menor, de 18%, portanto com menor teor de umidade, a condutividade aumentou de 1,92 quando seca para 2,57 W/m.K quando saturada.

Em ensaios realizados com argamassas de cimento, foi medida a condutividade térmica de amostras ao ar livre e depois de secas em estufa. Nos resultados, obteve-se uma redução de cerca de 40% na condutividade térmica das amostras após a secagem em estufa (ROUSAN; ROY, 1983).

O motivo pelo qual a presença de umidade nos poros do material aumenta a condutividade térmica não se restringe apenas ao fato de que a condutividade térmica da água seja maior do que do ar. Mingzhi *et al* (2009) mostraram que, a temperaturas mais elevadas, a água presente nos poros começa a evaporar, se difundindo pela rede de poros do material. Ao se difundir, o vapor transporta calor, contribuindo para o aumento da condutividade térmica.

Outra propriedade térmica importante é o calor específico (c), que define a quantidade de calor que cada grama de uma substância necessita trocar para variar sua temperatura em 1 °C. Sua unidade de medida no sistema internacional é o J/kg.K (CHICHIERCHIO, 1990). Desse modo, quanto menor o calor específico de uma substância, mais facilmente ela pode sofrer variações em sua temperatura.

Os valores de calor específico encontrados na literatura (Tabela 2), para os materiais cerâmicos utilizados em alvenaria, em temperatura ambiente, situam-se entre 835 e 920 J/kg.K (INCROPERA; DEWITT, 1992; LAMBERTS *et al*, 2007).

Tabela 2 – Calor específico de materiais cerâmicos.

Calor Específico (J/kg.K)	Descrição	Origem	Autor
835	Tijolo comum	EUA	Incropera; Dewitt, 2002
840	Tijolo comum	Inglaterra	Buchanan, 2002
870	Tijolo vazado 10×30×57 cm	França	Nguyen <i>et al</i> , 2009
900	Bloco vazado 19,7×19,7×49 cm	França	Al Nahhas <i>et al</i> , 2007
920	Tijolo comum	Brasil	Lamberts <i>et al</i> , 2007

No entanto, o calor específico de um material também sofre grande influência da temperatura em que o mesmo se encontra. Estudos realizados com materiais cerâmicos secos mostraram que, de modo geral, o calor específico sofre um aumento com a elevação da temperatura, até atingir um valor aproximadamente constante (PADILHA, 1997; PINTO *et al*, 2006).

O Eurocódigo EN 1996-1-2 - Design of masonry structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, em seu Anexo D, também tratou da influência da temperatura no calor específico para blocos cerâmicos e de concreto, conforme reproduzido na Figura 7 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005).

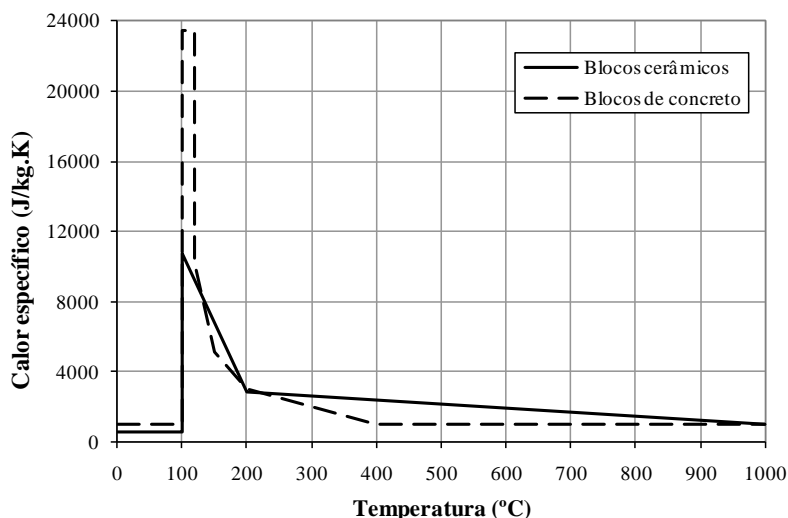


Figura 7 – Calor específico para blocos cerâmicos e blocos de concreto (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005).

Na Figura 7, percebe-se a ocorrência de um aumento súbito no calor específico para temperaturas por volta de 100 °C. Tal aumento deve-se ao calor latente de evaporação da umidade incorporada nos poros do material, o qual é somado ao calor específico do material, obtendo o calor específico efetivo. Nguyen *et al* (2009) também sugerem a adoção de um calor específico efetivo para a cerâmica, somando ao calor específico deste material o calor latente de evaporação da umidade presente nos poros, de forma a simplificar os cálculos de transferência de calor. O valor do acréscimo equivalente ao calor latente

de evaporação da água depende do teor de umidade presente e do intervalo de temperatura em que se considera a mudança da fase líquida para a fase gasosa (NGUYEN *et al*, 2009).

Após a apresentação da condutividade térmica e do calor específico, pode-se introduzir o conceito de difusividade térmica. A difusividade térmica (α) é uma propriedade que exprime a relação entre a capacidade do material conduzir energia térmica e a capacidade deste material de acumular energia térmica, estabelecendo uma relação entre a condutividade térmica (k) e o calor específico (c). Tem como unidade o m^2/s , e é definida pela Equação (16).

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c} , \quad (16)$$

onde: k = condutividade térmica (W/m.K); ρ = densidade (kg/m^3); e c = calor específico (J/kg.K).

Os materiais com alta difusividade térmica respondem rapidamente às variações do ambiente térmico, enquanto que materiais com baixa difusividade térmica respondem mais lentamente, levando mais tempo para atingir novas condições de equilíbrio (INCROPERA; DEWITT, 1992).

Após a apresentação dos fenômenos envolvidos na transferência de calor através de uma parede de alvenaria em situação de incêndio, pode-se partir para a identificação dos fatores que influenciam o desempenho ao fogo das paredes de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos, uma vez que o desempenho está diretamente relacionado ao isolamento térmico proporcionado pela parede, assim como depende da resistência mecânica dos blocos e da argamassa.

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO AO FOGO DE PAREDES DE ALVENARIA

O desempenho ao fogo de uma parede de alvenaria depende de diversos fatores. Primeiramente, destacam-se fatores ligados ao tipo de bloco utilizado na alvenaria, compreendendo as características do material utilizado e a geometria dos blocos (THOMAZ; HELENE, 2000). Além do bloco, as características construtivas como o tipo das

juntas de assentamento, dos revestimentos e do preenchimento dos vazados também exercem influência na resistência ao fogo (THOMAZ; HELENE, 2000; MEYER, 2006). Por fim, Meyer (2006) ainda apresenta alguns fatores ligados à estabilidade estrutural da parede, como o índice de esbeltez da parede, o carregamento aplicado e a presença de excentricidades.

A seguir são apresentados os fatores mais importantes, organizados em 4 grupos distintos: os fatores relativos ao material utilizado, às características geométricas dos blocos, ao processo construtivo e à estabilidade estrutural das paredes.

2.3.1 Material do bloco de assentamento

O desempenho ao fogo da parede de alvenaria é muito influenciado pelas características do material utilizado na fabricação do bloco, suas propriedades termofísicas, como condutividade e calor específico, além da densidade, porosidade e resistência mecânica (THOMAZ; HELENE, 2000; MEYER, 2006).

Inicialmente, deve-se considerar que, devido a diferenças na matéria-prima e no processo de fabricação, os blocos podem apresentar diferentes características termofísicas, as quais oferecerão diferentes graus de isolamento térmico da parede (THINK BRICK AUSTRALIA, 2006). Paredes construídas com materiais de menor condutividade térmica oferecem maior isolamento térmico, fato que representa uma maior resistência ao fogo. No entanto, materiais com alto calor específico absorvem grandes quantidades de calor, dificultando a transmissão de calor através da parede. Deste modo, a eficiência de uma parede em proporcionar isolamento térmico depende da combinação de baixa condutividade térmica e alto calor específico, ou seja, baixa difusividade térmica.

A influência do tipo de material constituinte na resistência ao fogo da parede de alvenaria foi verificada por meio de ensaios realizados por diferentes autores (THOMAZ, HELENE, 2000; CHICHIERCHIO, 1990), levando em consideração os requisitos de isolamento térmico, estanqueidade e resistência mecânica, mostrando que os blocos cerâmicos possuem melhor resistência ao fogo do que os blocos de concreto.

Os ensaios realizados por Thomaz e Helene (2000) obtiveram períodos de resistência ao fogo de 100 minutos para paredes com blocos

cerâmicos com espessura de 14 cm (classe de resistência ao fogo de 90 minutos). Já para paredes com blocos de concreto, com a mesma espessura, o período de resistência ao fogo encontrado foi de 80 minutos (classe de resistência ao fogo de 60 minutos). Os resultados encontrados por Chichierchio (1990) foram similares aos obtidos por Thomaz e Helene (2000). Para paredes construídas com blocos cerâmicos, com espessura de 14 cm, foi obtida uma classe de resistência ao fogo de 90 minutos, enquanto que, para blocos de concreto de mesma espessura, a classe de resistência ao fogo foi de 60 minutos.

O melhor desempenho ao fogo dos blocos cerâmicos pode ser explicado devido à maior resistência térmica da cerâmica, conforme comprovado em ensaios realizados por Al-Hadhrani e Ahmad (2008) com diferentes materiais, em que os blocos cerâmicos apresentaram resistência térmica superior em 155% aos blocos de concreto.

A densidade e a porosidade do bloco também exercem influência na resistência ao fogo das paredes, devido ao fato de que a umidade presente no interior dos poros dos blocos consome grande parte do calor que atravessa a parede para a mudança de fase (evaporação) da água (NGUYEN *et al*, 2009; ALLEN; HARMATHY, 1972; AL NAHHAS *et al*, 2007).

2.3.2 Geometria do bloco de assentamento

As características geométricas do bloco utilizado, como o tipo de bloco (maciço ou vazado), as dimensões externas, a porcentagem e o formato dos vazados e das partes maciças, também influenciam fortemente a resistência ao fogo das paredes (NGUYEN *et al*, 2009).

Com base na teoria de transferência do calor por condução, espera-se que, quanto maior a espessura da parede de alvenaria, maior será o isolamento térmico oferecido, e, por conseguinte, maior será o valor da resistência ao fogo. No entanto, a existência de vazados no interior dos blocos altera o isolamento térmico oferecido pela parede de duas formas distintas. Primeiramente, devido à transmissão de calor através dos vazados ocorrer pelos mecanismos de convecção e radiação, ao invés de condução, como ocorre em partes sólidas, a condutividade térmica efetiva dos blocos será diminuída, contribuindo para o aumento do isolamento térmico, conforme comprovado em ensaios realizados por Zsemberly, Clarke e McNeilly (2006) em alvenarias de tijolos cerâmicos. Entretanto, as partes vazadas dos blocos não absorvem parte do calor

que atravessa a parede, como ocorre com as partes sólidas, diminuindo a quantidade total de calor absorvido pelos blocos, e, desse modo, diminuindo o isolamento térmico.

Além do volume de vazados, o formato e a distribuição destes no interior do bloco também influenciam o isolamento térmico. A divisão de um vazado de um bloco de alvenaria em dois outros vazados menores, que tenham a mesma dimensão total, irá proporcionar um aumento significativo no isolamento térmico da parede, embora não altere a espessura do bloco (AL-HADHRAMI; AHMAD, 2008; ALLEN; HARMATHY, 1972).

Por fim, as dimensões externas dos blocos também influenciam o isolamento térmico e a resistência ao fogo da alvenaria, pois o tamanho do bloco determina a quantidade de juntas de argamassa de assentamento, alterando o isolamento térmico total da parede, devido às diferentes propriedades termofísicas da cerâmica e da argamassa.

2.3.3 Processo construtivo

O processo construtivo, que estabelece características como o tipo de argamassa utilizada para o assentamento dos blocos, o tipo e a espessura de juntas, o preenchimento dos vazados dos blocos e o revestimento das paredes, tem grande influência na resistência ao fogo da alvenaria (THOMAZ; HELENE, 2000; MEYER, 2006).

A argamassa utilizada nas juntas horizontais e verticais de assentamento dos blocos, assim como o tipo das juntas, influencia o isolamento térmico total da parede, pois a argamassa possui propriedades diferentes daquelas dos blocos cerâmicos. Além disso, o tipo de argamassa, que pode ser comum ou com materiais isolantes adicionados à mistura, também influencia a transferência de calor através da parede, uma vez que materiais isolantes aumentam o isolamento térmico da argamassa (AL-HADHRAMI; AHMAD, 2008).

Outro fator de grande influência na resistência ao fogo relacionado ao processo construtivo é a presença de enchimentos nos vazados dos blocos da alvenaria. No caso da alvenaria estrutural, muitas vezes elas são grauteadas, a fim de aumentar a sua resistência mecânica ou sua rigidez. Este grauteamento das paredes, embora aumente a condutividade térmica efetiva, aumenta fortemente a quantidade de calor absorvido pela parede, aumentando, portanto, o isolamento térmico da alvenaria (OLIVEIRA, 1998; AL-HADHRAMI; AHMAD, 2008).

Desse modo, as unidades vazadas grauteadas conseguem apresentar um comportamento ao fogo semelhante ao das unidades completamente maciças (PANARESE; KOSMATKA; RANDALL JR., 1991).

Além do grauteamento, o aumento no isolamento térmico também pode ser obtido através do enchimento dos vazados das unidades com areia e com materiais de baixa massa específica, tais como escória, pedra-pomes, argila expandida, perlita e vermiculita (BRICK INDUSTRY ASSOCIATION, 2008).

A eficiência do preenchimento dos vazados foi verificada por De Vekey (1998), na realização de ensaios de resistência ao fogo em paredes duplas. O autor observou que a colocação de isolantes, tais como poliestireno e lã de rocha, entre as paredes, fez com que estas apresentassem resistências térmicas maiores do que aquelas sem isolantes, apenas com a camada de ar entre as mesmas.

A resistência ao fogo das alvenarias com blocos cerâmicos também sofre a influência de revestimentos de argamassa em um ou em ambos os lados de uma parede (BEALL, 1994). A camada de revestimento, ao aumentar a espessura da parede, aumenta o isolamento térmico e, desse modo, a resistência ao fogo da mesma. Contudo, deve-se ter cuidado com o fato de que o aumento do isolamento térmico proporcionado pela camada de revestimento, no lado exposto ao fogo, fica limitado ao tempo em que esta é capaz de se manter solidária à parede durante o ensaio ao fogo ou incêndio (OLIVEIRA, 1998).

O aumento na resistência ao fogo devido à camada de revestimento de argamassa foi comprovado através de ensaios por Chichierchio (1990). Para paredes construídas sem revestimento, a classe de resistência ao fogo encontrada foi de 90 minutos. No caso de paredes com revestimento de argamassa de cimento e areia, com espessura de 1,5 cm em cada face, a classe de resistência ao fogo das paredes aumentou para 120 minutos.

2.3.4 Estabilidade estrutural

Os fatores que influenciam a resistência ao fogo discutidos até este ponto diziam respeito principalmente ao requisito de isolamento térmico da parede. Contudo, alguns fatores exercem influência em outro requisito determinante da resistência ao fogo, a estabilidade estrutural da parede quando submetida a um incêndio, a qual tem uma importância maior no caso da alvenaria estrutural, uma vez que as paredes têm a

função de resistir a todos os carregamentos aplicados na edificação (ONO, 2007).

Dentre os fatores ligados à estabilidade estrutural da parede durante o incêndio, encontram-se a degradação dos materiais em altas temperaturas, o encurvamento devido à dilatação térmica, as restrições e a geometria da parede e a presença de excentricidades (MEYER, 2006).

Sabe-se que a estabilidade de uma parede depende, dentre outros fatores, da resistência mecânica dos elementos que a constituem, além das interações ocorridas entre os mesmos: blocos, argamassa, grautes, armaduras. Entretanto, quando expostos a altas temperaturas, os elementos constituintes da parede podem sofrer degradação de suas propriedades, como a resistência mecânica. No caso dos blocos utilizados, a degradação pode diminuir sua resistência mecânica e gerar uma fissuração excessiva, podendo levar o bloco à ruptura. Pode ocorrer também com a argamassa utilizada para o assentamento dos blocos, comprometendo a unidade da parede e levando à desintegração da alvenaria.

Devido à exposição ao fogo ocorrer em apenas uma face da parede, haverá um gradiente térmico na espessura da parede. Desse modo, a dilatação térmica será maior nas partes mais aquecidas, gerando um encurvamento da parede na direção do fogo. O encurvamento faz com que as cargas aplicadas tenham as suas excentricidades aumentadas, gerando momentos de segunda ordem, os quais aumentam as solicitações sobre a parede, o que pode resultar no colapso estrutural da mesma (NADJAI, 2006).

O grau do encurvamento ocorrido na parede depende diretamente do coeficiente de dilatação térmica linear do material. Este coeficiente, no caso da cerâmica, é de cerca de $5,5 \times 10^{-6}$ m/m.K, valor inferior ao do concreto, por exemplo, de cerca de $14,5 \times 10^{-6}$ m/m.K. O encurvamento também depende da condutividade térmica do material, pois a condutividade influencia no gradiente térmico entre as faces da parede.

Por fim, outras características como a vinculação e a geometria da parede também exercem influência na estabilidade estrutural das paredes quando submetidas ao fogo, pois são importantes na determinação da esbeltez do conjunto. Além disso, a vinculação também pode gerar esforços internos adicionais, uma vez que impede deslocamentos devido à dilatação térmica (THINK BRICK AUSTRALIA, 2006; NGUYEN *et al*, 2009).

A redução da esbeltez da parede, fato que aumenta a sua estabilidade e reduz os efeitos dos momentos de segunda ordem, tem sido adotada como medida para aumentar a segurança contra o colapso estrutural. Oliveira (1998) sugere que a esbeltez seja diminuída aumentando-se a espessura das paredes ou, também, prevendo-se suportes ou pilares ao longo dos bordos das paredes.

Neste tópico, foram verificados os fatores dos quais depende a resistência ao fogo das paredes de alvenaria. Desse modo, têm-se instrumentos para a definição dos materiais constituintes e do processo construtivo a ser utilizado nas paredes, de forma a melhorar a resistência ao fogo das mesmas.

2.4 MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO FOGO

Praticamente todos os países possuem normas que especificam o tempo de resistência ao fogo que os elementos construtivos devem apresentar. Desse modo, para que possam ser utilizados nas edificações, os elementos devem ter sua resistência ao fogo previamente determinada (BUCHANAN, 2002).

Tradicionalmente, a resistência ao fogo de uma parede de alvenaria tem sido determinada por meio de ensaios, embora demorados e de custo elevado (BEALL, 1994; BUCHANAN, 2002). Contudo, a resistência ao fogo também pode ser determinada através de métodos de cálculo analíticos e numéricos, gerando uma redução nos custos e no tempo necessário para a determinação (BEALL, 1994; BRICK INDUSTRY ASSOCIATION, 2008).

Neste trabalho, serão apresentados três métodos para a determinação da resistência ao fogo de paredes de alvenaria: a realização de ensaios de resistência ao fogo, o método analítico de cálculo do Brick Industry Association, e o método numérico de cálculo por meio de elementos finitos.

2.4.1 Métodos experimentais de determinação da resistência ao fogo

De um modo geral, os ensaios de resistência ao fogo consistem no posicionamento de uma amostra da parede submetida a ações de

serviço em frente a um forno, onde em seu interior aplica-se uma ação térmica controlada, sendo monitorados os requisitos de segurança estrutural, estanqueidade e o isolamento térmico durante a exposição ao calor. A resistência ao fogo é determinada pelo tempo em que as amostras continuam a atender estes requisitos (BUCHANAN, 2002).

Segundo a literatura (BEALL, 1994; BRICK INDUSTRY ASSOCIATION, 2008; OLIVEIRA, 1998), geralmente, o término do ensaio de resistência ao fogo de uma parede de alvenaria de blocos cerâmicos é devido ao isolamento térmico, que deixa de ser atendido antes dos requisitos de resistência mecânica e estanqueidade. Muitas vezes, este fato pode ser constatado em incêndios, onde as paredes de alvenaria continuaram de pé, enquanto que outras partes da edificação foram destruídas ou consumidas durante o fogo (BRICK INDUSTRY ASSOCIATION, 2008).

Para a realização do ensaio, existem normas regulamentadoras nacionais e estrangeiras. No Brasil, o ensaio de determinação da resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural é normatizado pela norma NBR 5628 (ABNT, 2001), a qual apresenta uma grande similaridade com as normas estrangeiras ASTM E 119 (ASTM, 2008) e ISO 834 (ISO, 1999).

Na Tabela 3 são apresentadas as principais exigências realizadas por tais normas, abrangendo os aspectos referentes às amostras, instrumentação e medições. Pode-se verificar a existência de uma grande semelhança entre as recomendações das normas apresentadas na Tabela 3, principalmente entre a ISO 834 e a NBR 5628, visto que a primeira serviu de texto base para a segunda (SILVA, 2007).

Uma das principais diferenças encontradas entre as normas diz respeito à ação térmica controlada que deve ser aplicada no interior do forno. A ISO 834 e a NBR 5628 estabelecem uma curva padronizada determinada por meio da Equação (17), enquanto que a ASTM E 119 estabelece a curva de aquecimento por meio de uma série de pontos, mostrada na Tabela 4.

$$T = T_0 + 345 \log(8t + 1) , \quad (17)$$

onde: T = temperatura do forno em °C no instante t ; T_0 = temperatura inicial do forno em °C; e t = tempo em minutos a contar do início do ensaio.

Tabela 3 – Comparação das exigências realizadas pelas normas ASTM E 119, ISO 834 e NBR 5628.

Item	ASTM E 119	ISO 834	NBR 5628
Primeira edição da norma	1917	1975	1980
Edição atual da norma	2008	1999	2001
Dimensões mínimas da amostra	área de 9 m ² e nenhuma dimensão inferior a 2,7 m	3,0 × 3,0 m	2,5 × 2,5 m
Apoio e vinculação	simular as características reais	simular as condições de serviço	idênticos as condições reais de uso
Carregamento	aplicar o carregamento máximo permitido pelos critérios de projeto	reproduzir condições de suporte de projeto	reproduzir esforços de mesma natureza e ordem de grandeza das ações normais de serviço
Pressão interna do forno	não estabelece	2,0 mmca	1,5 mmca
Curva de aquecimento	série de pontos “tempo-temperatura”	Equação (17)	Equação (17)
Teste de jato de água	exige	não exige	não exige

Tabela 3 (cont.) – Comparação das exigências realizadas pelas normas ASTM E 119, ISO 834 e NBR 5628.

Item	ASTM E 119	ISO 834	NBR 5628
Medição de temperatura no interior do forno	9 termopares afastados a 152 mm da face	1 “termômetro de placas” para cada 1,5 m ² de amostra, afastado a 100 mm da face	1 termopar com diâmetro entre 0,75 e 1,50 mm para cada 1,5 m ² de amostra, afastado a 100 mm da face
Medição de temperatura na face não exposta ao fogo	mínimo de 9 termopares com diâmetro até 1,02 mm, cobertos por material isolante	mínimo de 5 termopares com diâmetro até 0,5 mm, unidos em disco de cobre com diâmetro 12 mm e espessura 0,2 mm, cobertos por material isolante	mínimo de 5 termopares com diâmetro até 0,5 mm, unidos em disco de cobre com diâmetro 12 mm e espessura 0,2 mm, cobertos por material isolante
Requisito de resistência mecânica	deve suportar o carregamento sem ruína	define valor máximo e taxa de aumento máxima das deformações	ruína, deslocamentos transversais elevados ou deformações excessivas
Requisito de estanqueidade	inflamação de um chumaço de algodão colocado sobre as fissuras	inflamação de um chumaço de algodão colocado sobre as fissuras por 30 seg	inflamação de um chumaço de algodão colocado a 30 mm de fissuras por 10 seg
Requisito de isolamento	aumento da temperatura da face não exposta ao fogo de 250 °F (139 °C) na média dos pontos	aumento da temperatura da face não exposta ao fogo de 140 °C na média, ou de 180 °C em um único ponto	aumento da temperatura da face não exposta ao fogo de 140 °C na média, ou de 180 °C em um único ponto

Tabela 4 – Pontos determinantes recomendados pela norma ASTM E119.

Tempo	Temperatura (°C)
5 min	538
10 min	704
30 min	843
1 h	927
2 h	1010
4 h	1093
8 h	1093

Na Figura 8 estão representadas as curvas padronizadas temperatura-tempo recomendadas pela ISO 834 e NBR 5628 e pela ASTM E 119, lembrando que as curvas propostas pelas normas ISO 834 e NBR 5628 são iguais.

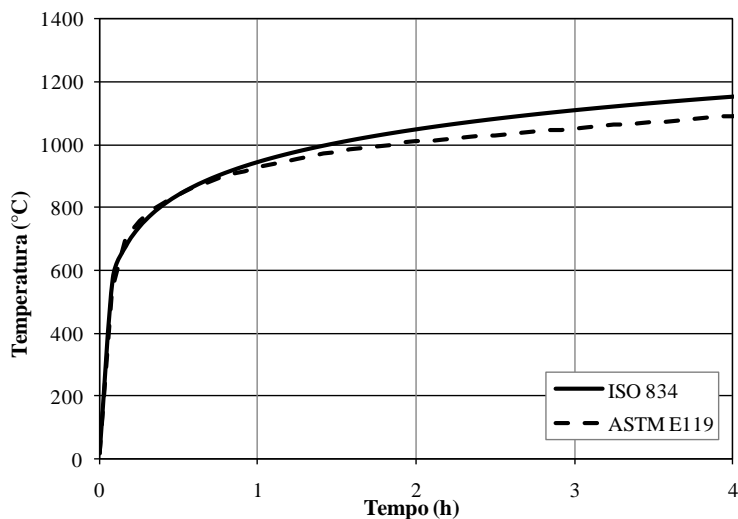


Figura 8 – Curvas padronizadas das normas ISO 834 e ASTM E119.

Além de proporem curvas ligeiramente diferentes, as normas ISO 834 e ASTM E 119 prescrevem modos diferentes de efetuar a medição das temperaturas no interior do forno, exigindo termopares posicionados em afastamentos diferentes da face interna da amostra (BUCHANAN, 2002). No entanto, os resultados obtidos segundo as recomendações da ISO 834 e da ASTM E119 são bastante próximos,

conforme mostraram ensaios realizados por Harmathy e Sultan (1988) em amostras idênticas, encontrando uma diferença inferior a cinco minutos na resistência ao fogo obtida.

Deve-se atentar que a ação térmica aplicada conforme uma curva padronizada não representa exatamente o desenvolvimento de um incêndio real (Figura 2), pois corresponde somente à fase de desenvolvimento do incêndio. Desse modo, embora forneça o tempo de resistência ao fogo, o ensaio não representa o verdadeiro comportamento das paredes em situações de incêndio, mas sim o comportamento das paredes sob a condição de um incêndio-padrão, permitindo uma avaliação apenas qualitativa, que serve de base para comparação do desempenho ao fogo de diferentes elementos construtivos (BRICK INDUSTRY ASSOCIATION, 2008).

Embora a ISO 834 e a NBR 5628 apresentem apenas uma curva padronizada (Equação 17), adequada para representar incêndios ocorridos em ambientes com materiais celulósicos, existem outras curvas padronizadas, para diferentes tipos de incêndio, oferecidas pela norma EN 1991-1-2 (COMITE EUROPEEN DE NORMALISATION, 2002), as quais podem ser utilizadas de acordo com a situação mais conveniente.

Uma destas curvas padronizadas foi definida para o caso em que o material combustível armazenado no compartimento é constituído por hidrocarbonetos, provocando um incêndio de maior intensidade do que a curva padronizada para materiais celulósicos. Nestes casos, a curva padronizada é definida pela Equação (18).

$$T = T_0 + 1080 \cdot (1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) \quad (18)$$

Para o caso de elementos situados no exterior de um compartimento submetido a um incêndio, a norma EN 1991-1-2 também estabelece uma curva padronizada específica. Nesse caso, os elementos externos estariam expostos a temperaturas menores do que os elementos existentes no interior do compartimento. Desse modo, a curva padronizada para fogo exterior é dada pela Equação (19).

$$T = T_0 + 660 \cdot (1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) \quad (19)$$

Na Figura 9 estão representadas graficamente as curvas padronizadas temperatura-tempo propostas pela norma européia EN

1991-1-2 para incêndios em materiais celulósicos, para incêndios em hidrocarbonetos, e para incêndios em elementos exteriores. Verifica-se que a curva para hidrocarbonetos provoca maior intensidade de calor, principalmente no início do ensaio, enquanto que a curva para incêndios no exterior da edificação apresenta temperaturas cerca de 40% inferiores às demais curvas.

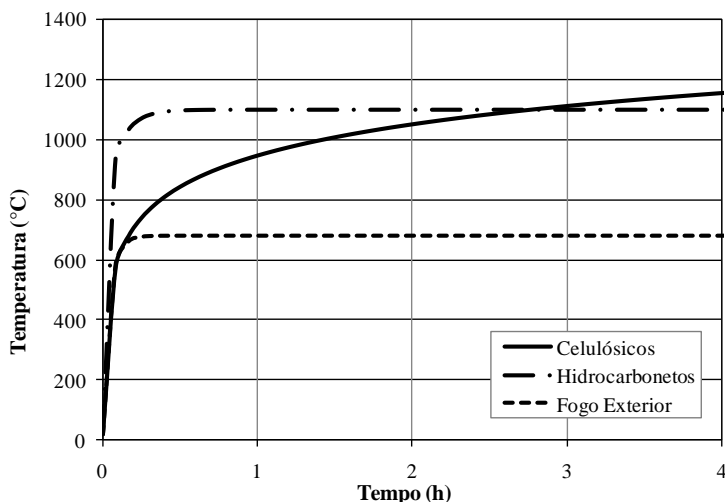


Figura 9 – Curvas padronizadas das normas ISO 834 e EN 1991-1-2.

Além de oferecer as curvas padronizadas, a norma EN 1991-1-2 também permite a utilização de curvas de temperatura-tempo naturais, onde o cenário do incêndio é modelado de forma simplificada, representando a evolução do incêndio e suas fases de forma mais precisa do que as curvas padronizadas (SILVA, 2008). As curvas são parametrizadas em função da carga de incêndio, do grau de ventilação e das características (massa específica, calor específico e condutividade térmica) dos elementos de compartimentação (KAEFER; SILVA, 2003).

A Figura 10 ilustra um exemplo de uma curva temperatura-tempo parametrizada, mostrando a semelhança entre esta curva e a curva real de um incêndio.

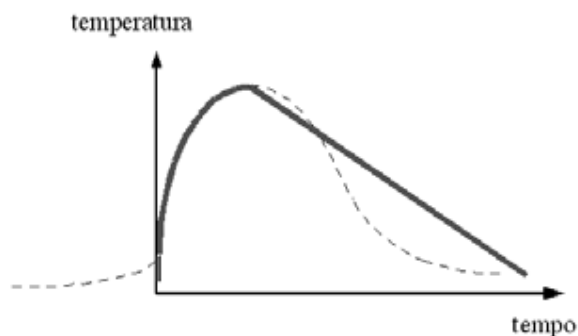


Figura 10 – Curvas de incêndio natural (tracejada) e parametrizada (contínua) (SILVA *et al*, 2008).

A ASTM E 119, ao contrário das normas ISO 834 e NBR 5628, menciona ainda a necessidade de avaliar o comportamento da parede a um jato de água, aplicado logo após o término do ensaio de resistência ao fogo. A parede não deve entrar em colapso e não deixar passar água através de suas fissuras. Este teste indica o quanto a parede pode resistir a solicitações que freqüentemente ocorrem durante um incêndio real, tais como explosões, jatos de água reais usados para o combate ao incêndio, impactos e erosões (NWCMA, 2005).

Independentemente da norma utilizada, a realização dos ensaios experimentais é complexa, demandando a construção de corpos de prova em tamanho real, o uso de diversos instrumentos de monitoramento de temperatura no interior e na face exterior da amostra, e o uso de grande quantidade de combustível ou eletricidade para a aplicação da ação térmica (BRICK INDUSTRY ASSOCIATION, 2008; NADJAI, 2006). Tais características dificultam a realização de repetições de um mesmo cenário ou a realização de ensaios com diferentes variáveis, tais como diferentes blocos, revestimentos e enchimentos (BEALL, 1994; NGUYEN *et al*, 2009).

2.4.2 Métodos de cálculo da resistência ao fogo

Devido à complexidade e ao alto custo da realização do ensaio de resistência ao fogo, alguns métodos de cálculo têm sido utilizados em substituição ao método experimental. Por meio destes métodos, consegue-se reduzir os custos e o tempo necessários para a determinação

da resistência ao fogo (BEALL, 1994; BRICK INDUSTRY ASSOCIATION, 2008).

Os métodos de cálculo apresentados nesta seção serão o método analítico de cálculo do Brick Industry Association e o método dos elementos finitos.

Método do Brick Industry Association

O método de cálculo proposto pelo Brick Industry Association – BIA é um método analítico reconhecido internacionalmente que permite determinar a resistência ao fogo de forma rápida e simples (PANARESE; KOSMATKA; RANDALL JR., 1991; NADJAI, 2006). Esse método utiliza a espessura equivalente da parede, tendo sido desenvolvido a partir de uma metodologia apresentada pelo National Bureau of Standards (1942), no boletim BMS 92 – “Fire resistance classifications of building construction”, que leva em consideração apenas o critério de isolamento térmico, baseando-se no aumento de temperatura na face não exposta ao fogo da alvenaria (BRICK INDUSTRY ASSOCIATION, 1991; OLIVEIRA, 1998).

A espessura equivalente de uma parede de alvenaria é a espessura média do material sólido da própria parede (BRICK INDUSTRY ASSOCIATION, 2008; OLIVEIRA, 1998). No caso de paredes sem revestimentos ou preenchimentos, a espessura equivalente pode ser determinada pela medição do volume total do bloco, subtraindo o volume de espaços vazios, e dividindo pela área da face exposta do bloco, conforme a Equação (20):

$$E_{eq} = \frac{V_{liq}}{C \cdot H} \quad , \quad (20)$$

onde: E_{eq} = espessura equivalente do bloco; V_{liq} = volume líquido do bloco; C = comprimento real do bloco; e H = altura real do bloco.

A espessura equivalente também pode ser calculada em função da porcentagem de material sólido do bloco, na forma da Equação (21):

$$E_{eq} = \%_S \cdot E_{bloco} \quad , \quad (21)$$

onde: E_{bloco} = espessura real do bloco; e $\%_S$ = porcentagem de material sólido do bloco.

No caso de paredes de alvenaria grauteadas, onde os vazados dos blocos estão inteiramente preenchidos com graute, a espessura equivalente da parede pode ser tomada como a espessura real do bloco utilizado na parede. A mesma consideração pode ser feita quando os vazios dos blocos são preenchidos com materiais como: areia, escória, pedra-pomes, argila expandida, perlita e vermiculita (BRICK INDUSTRY ASSOCIATION, 2008).

Quando as paredes apresentarem algum revestimento nas suas faces, as mesmas terão a espessura equivalente acrescida de uma parcela referente à espessura do revestimento, que depende do lado onde o revestimento está aplicado.

Para os revestimentos aplicados no lado da parede não exposto ao fogo, primeiramente, a espessura do revestimento deve ser convertida em espessura equivalente da alvenaria, multiplicando-se a espessura do revestimento por um fator de correção. Este fator de correção depende do material do bloco utilizado, da geometria do bloco e do tipo de revestimento empregado, sendo encontrado em uma tabela fornecida pelo Brick Industry Association (2008).

Para alvenarias de blocos cerâmicos vazados, com revestimentos de argamassa de cimento e areia, o fator de correção é 0,75. O produto da multiplicação deste fator pela espessura do revestimento pode, então, ser somado à espessura equivalente da parede.

Já para os revestimentos aplicados no lado da parede exposto ao fogo, para o caso de revestimentos de argamassa de cimento e areia, pode ser adicionado à espessura equivalente da alvenaria o menor dos seguintes valores: a espessura real do revestimento, ou o valor de 15,9 mm (BRICK INDUSTRY ASSOCIATION, 2008).

A espessura equivalente de paredes com revestimentos em suas faces é determinada pela Equação (22).

$$E_{eq} = E_{reb1} + \%_S \cdot E_{bloco} + f \cdot E_{reb2} \quad , \quad (22)$$

onde: E_{reb1} = espessura do revestimento na face exposta ao fogo; E_{reb2} = espessura do revestimento na face não exposta ao fogo; e f = fator de correção.

A partir da espessura equivalente de uma parede, pode-se então determinar o período de resistência ao fogo da mesma, por meio de equações desenvolvidas com base em dados coletados de vários ensaios de resistência ao fogo, as quais assumem a forma da Equação (23):

$$R = (c \cdot E_{eq})^n \quad , \quad (23)$$

onde: R = tempo de resistência ao fogo, em horas; c = coeficiente que depende do material e das unidades de medida utilizadas; E_{eq} = espessura equivalente da parede; e n = expoente que depende da taxa de aumento da temperatura na face exposta da parede.

O Brick Industry Association (2008) organizou a Tabela 5 que contém a espessura equivalente mínima que uma parede com blocos cerâmicos deve apresentar para atingir um determinado tempo de resistência ao fogo, conforme o tipo de material. A referida tabela foi obtida a partir da Equação (23), utilizando valores oriundos de diversos ensaios de resistência ao fogo realizados em paredes de alvenaria. Para valores de tempo diferentes dos apresentados, pode-se realizar uma interpolação linear entre os valores.

Tabela 5 – Tempo de resistência ao fogo de paredes de alvenaria cerâmica.

Tipo de Material	Espessura equivalente mínima para resistência ao fogo (mm)			
	1 h	2 h	3 h	4 h
Bloco sólido	69	97	124	152
Bloco vazado	58	86	109	127
Bloco vazado preenchido	76	112	140	168

A Tabela 5 também pode ser utilizada para determinar o tempo de resistência ao fogo de uma parede de alvenaria que possua uma determinada espessura equivalente.

Contudo, deve-se atentar que a Tabela 5 somente é válida para o cálculo da resistência ao fogo de paredes com características dos materiais e geométricas similares às das paredes submetidas aos ensaios que serviram de base para a confecção da tabela (BRICK INDUSTRY ASSOCIATION, 2008).

Os valores de resistência ao fogo em função da espessura equivalente da parede para paredes construídas com blocos cerâmicos vazados sem grauteamento e sem preenchimento no interior dos vazados estão ilustrados na Figura 11, em que se observa uma curva com formato potencial, conforme sugere a Equação (23).

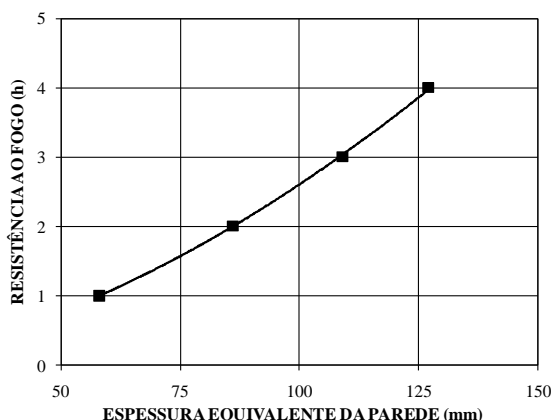


Figura 11 – Resistência ao fogo de paredes de blocos cerâmicos vazados em função da espessura equivalente.

As vantagens de simplicidade, rapidez e economia obtidas com a utilização do método analítico de cálculo proposto pelo Brick Industry Association fazem dele uma boa opção para se estimar a resistência ao fogo de uma parede de alvenaria. Entretanto, como se trata de um método simplificado, deve-se ter em mente que o valor obtido no cálculo possui pouca precisão, devendo ser utilizado com cuidado.

Método dos elementos finitos

O método numérico de cálculo por meio de elementos finitos também pode ser usado para a determinação da resistência ao fogo. Empregado largamente em todo o mundo, este método de elementos finitos consiste em uma abordagem numérica utilizada para resolver, de forma aproximada, as equações diferenciais que surgem em diversos campos da engenharia, como termodinâmica, mecânica estrutural, mecânica dos fluidos e eletromagnetismo, através da discretização espacial do corpo em pequenos elementos (FISH; BELYTCHKO, 2007).

A equação de difusão do calor (Equação 13) contém condições de contorno não-lineares e propriedades termofísicas que variam com a temperatura, exigindo a resolução de funções derivadas, que não podem ser resolvidas apenas com soluções analíticas. Além disso, para o caso de estruturas com geometrias e condições de contorno mais complexas,

difficilmente se poderá obter a solução exata dessas equações. Entretanto, por meio de métodos numéricos, consegue-se obter uma solução aproximada dessas equações, utilizando o método de elementos finitos para discretização espacial das paredes e os algoritmos de integração direta para discretização do tempo.

A validade da utilização do método de elementos finitos para a determinação da resistência ao fogo das paredes de alvenaria foi verificada em estudos publicados por Al Nahhas *et al* (2007) e Nguyen *et al* (2009). Nestas pesquisas, foram efetuados ensaios experimentais paralelamente a estudos numéricos, sendo obtidas curvas de evolução de temperaturas e resultados de resistência ao fogo muito similares.

Entretanto, deve-se ressaltar que, ao utilizar o método de elementos finitos para o cálculo da transferência de calor, a resistência ao fogo calculada somente abrange o critério de isolamento térmico, uma vez que não são calculadas a fissuração e a estabilidade da parede.

Inicialmente, para a resolução da Equação (13), pode-se aplicar o método de Galerkin (CHUNG, 1978), pelo qual a condição de ortogonalidade é procurada entre a equação e uma função residual contínua arbitrária v sobre todo o domínio Ω , resultando na Equação (24):

$$\int_{\Omega} \left(\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right) v \, d\Omega - \int_{\Omega} (\nabla k \cdot \nabla T) v \, d\Omega = \int_{\Omega} f v \, d\Omega \quad (24)$$

Quando integrada por partes, a Equação (24) resulta em:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \left(\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right) v \, d\Omega - \int_{\Omega} k \cdot \nabla T \cdot \nabla v \, d\Omega + \int_{\partial\Omega} (k \cdot \nabla T) \cdot n v \, d\Gamma \\ = \int_{\Omega} f v \, d\Omega \end{aligned} \quad (25)$$

A integral de superfície pode ser escrita como a soma de vários termos, conforme a Equação (26):

$$\int_{\partial\Omega} (k \nabla T) \cdot n v d\Gamma = \int_{\Gamma_1} (k \nabla T) \cdot n v d\Gamma_1 + \int_{\Gamma_2} h_c (T - T_s) \cdot v d\Gamma_2 \\ + \int_{\Gamma_3} \varepsilon \sigma T^4 \cdot v d\Gamma_3 - \int_{\Gamma_4} q \cdot v d\Gamma_4 , \quad (26)$$

onde: h_c = coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$); T_s = temperatura da superfície (K); ε = emissividade; σ = constante de Stefan-Boltzmann, igual a $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$; e T_s = temperatura da superfície (K).

As superfícies Γ_1 , Γ_2 , Γ_3 e Γ_4 são partes de um domínio $\partial\Omega$. A superfície Γ_1 corresponde às condições de contorno de Dirichlet, ou seja, temperaturas impostas, cuja primeira integral é nula. As três outras superfícies correspondem às condições de contorno Newmann e representam, respectivamente, a convecção, a radiação e o fluxo de calor impostos (PIERIN; ROVERE; MORAES, 2009).

Para a resolução da equação de transferência de calor por elementos finitos, admite-se a hipótese de que o sólido é composto por um conjunto de elementos finitos interconectados por nós, formando uma malha. Desse modo, as temperaturas de cada elemento são funções das temperaturas dos nós destes elementos. O método de Galerkin permite aproximar a temperatura pela interpolação dos valores nodais T_i (CHUNG, 1978):

$$T(x, y, t) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y) \cdot T_i(t) , \quad (27)$$

onde: $N_i(x, y)$ = função de forma associada ao nó i ; e n = inúmero de nós.

Substituindo-se a equação (27) na equação (24) e substituindo-se em seguida a função arbitrária v pelas funções de forma $N_i(x, y)$, a equação fundamental da conservação da energia é transformada em um sistema de equações diferenciais no tempo, que tomam a forma matricial da Equação (28) (PIERIN; ROVERE; MORAES, 2009). A resolução desse sistema matricial de equações diferenciais fornece o campo de temperatura em função do tempo, no domínio e no contorno.

$$C \cdot \dot{T} + K \cdot T = F, \quad (28)$$

onde: C = matriz de capacidade calorífica; K = matriz de condutividade térmica; \dot{T} = vetor de derivada parcial temporal da temperatura; T = temperatura; e F = vetor de potência térmica.

Os elementos das matrizes e dos vetores da Equação (28) são expressos conforme as Equações (29) a (31).

$$c_{ij} = \int_{\Omega} \left(\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right) N_i N_j d\Omega \quad (29)$$

$$k_{ij} = \int_{\Omega} N_i (k \nabla N_j) d\Omega + \int_{\Gamma_2} h_c N_i N_j d\Gamma_2 + \int_{\Gamma_3} \varepsilon \sigma T^3 N_i N_j d\Gamma_3 \quad (30)$$

$$f_i = \int_{\Omega} f N_i d\Omega + \int_{\Gamma_4} q N_i d\Gamma_4 + \int_{\Gamma_2} h_c T_s N_i d\Gamma_2, \quad (31)$$

onde: c_{ij} = elementos da matriz de capacidade calorífica; k_{ij} = elementos da matriz de condutividade térmica; e f_i = elementos do vetor de potência térmica.

Para a resolução do sistema de equações matriciais, deve-se fazer uso de um *software* especialmente desenvolvido para elementos finitos. O *software* deve ser alimentado com diversos dados, que abrangem a configuração geométrica da parede, os valores das propriedades dos materiais, a aplicação de calor e o modelo térmico.

Desse modo, a determinação da resistência ao fogo por meio do método de elementos finitos fornece resultados mais precisos e mais completos do que o método de cálculo proposto pelo Brick Industry Association, embora exija maior tempo nas etapas de alimentação do *software* e de análise computacional.

Após o estudo dos métodos experimentais e de cálculo, passou-se para a determinação da resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos por meio destes métodos, conforme mostrado nos Capítulos 3 e 4.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo é dedicado à parte experimental do estudo do desempenho ao fogo de paredes de alvenaria com blocos cerâmicos, envolvendo a apresentação dos materiais e métodos utilizados, dos resultados e das conclusões, referentes aos ensaios para a determinação do tempo de resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural. Ele está organizado em três seções: Materiais e Métodos, Resultados e Discussões e Resultados Parciais.

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, são apresentados os materiais e métodos utilizados para a realização dos ensaios para a determinação da resistência ao fogo de paredes com blocos cerâmicos, conforme as prescrições existentes na NBR 5628 (ABNT, 2001).

3.1.1 Materiais

Para a construção das amostras de paredes submetidas ao ensaio, foram utilizados blocos cerâmicos estruturais, assentados com argamassa mista de cimento, cal e areia média. Selecionou-se o bloco cerâmico estrutural da Cerâmica Constrular, de Pouso Redondo, SC, com resistência à compressão nominal de 9 MPa, massa de 6,5 kg e massa específica aparente de 843 kg/m^3 , dimensões externas de $14 \text{ cm} \times 19 \text{ cm} \times 29 \text{ cm}$, e paredes vazadas, com percentual total dos vazados de 52% (Figura 12). Os dois vazados principais do bloco apresentam formato retangular e dimensões de $9,5 \text{ cm} \times 7,6 \text{ cm}$, correspondendo a 68% do total dos vazados. O bloco possui ainda outros vazados retangulares e circulares, de menores dimensões, dispostos nas paredes dos blocos de forma a auxiliar a sua fabricação durante a etapa de secagem, correspondentes a 32% do total dos vazados.

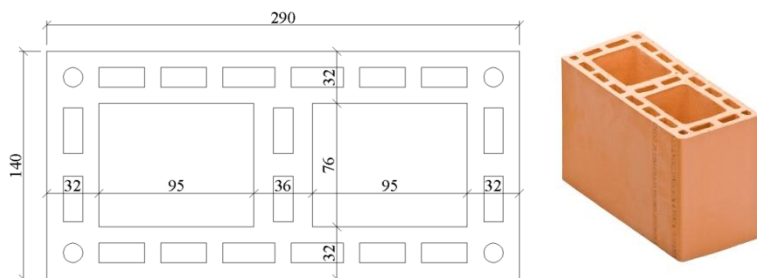


Figura 12 – Bloco cerâmico estrutural de 14 cm × 19 cm × 29 cm.

A argamassa utilizada no assentamento dos blocos foi do tipo mista, composta de cimento, cal e areia média, com traço na proporção em volume de 1:1:6, com fator água/cimento ajustado manualmente para trabalhabilidade adequada. A resistência à compressão média da argamassa foi de 7,73 MPa, obtida em ensaios em corpos de prova cujos resultados são mostrados no Apêndice A.

A areia utilizada na argamassa e no preenchimento dos vazados possui granulometria média, módulo de finura 3,14 e massa específica 2.630 kg/m³. Encontrava-se estocada ao ar livre, sendo coletada uma amostra que apresentou teor de umidade de 12%. Não foi controlado o teor de umidade da areia no instante do ensaio. Os resultados dos ensaios de granulometria realizado na areia estão mostrados no Apêndice B.

3.1.2 Amostras e corpos de prova

Neste trabalho, foi confeccionada e ensaiada apenas uma amostra de parede para cada configuração estudada, embora se saiba que, em termos estatísticos, a utilização dos valores obtidos com ensaios realizados em amostras únicas é inadequada. Este procedimento foi adotado devido ao custo elevado dos ensaios, dado a utilização de materiais e mão de obra para a confecção dos fornos, a instrumentação dos ensaios e à grande quantidade de material combustível utilizado para o aquecimento do interior do forno.

As paredes foram construídas com os blocos assentados em fiadas horizontais, utilizando juntas de argamassa com espessura de 1,0 cm, obtendo dimensões totais de 2,70 m de largura e 2,60 m de altura. Foram construídas em 4 diferentes configurações: parede sem

revestimento e sem preenchimento; parede com revestimento nas faces interna e externa; parede com enchimento nos vazados; e parede com revestimento e com enchimento.

Nas paredes com revestimento, foi utilizada uma argamassa nas faces interna e externa das paredes com espessura de 1,5 cm. Por sua vez, nas paredes com enchimento, foi utilizada a areia como material de enchimento dos vazados principais dos blocos.

O revestimento com argamassa e o enchimento dos vazados com areia foram escolhidos como variáveis por que os mesmos são soluções de baixo custo atualmente utilizadas por projetistas para aumentar a resistência ao fogo de alvenarias (BRICK INDUSTRY ASSOCIATION, 2008).

As Figuras 13 a 16 ilustram os detalhes das paredes utilizadas.

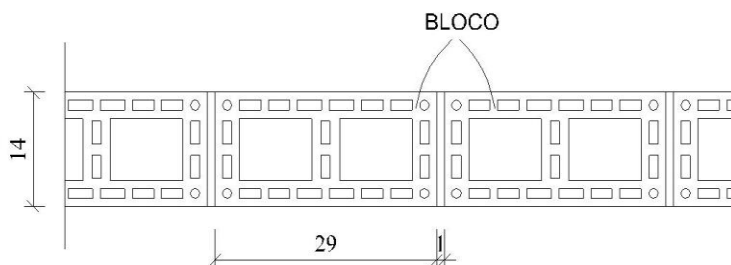


Figura 13 – Detalhe parede sem preenchimento e sem revestimento.

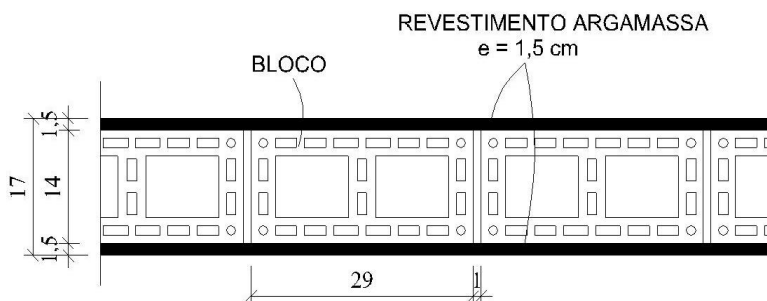


Figura 14 – Detalhe parede sem preenchimento e com revestimento.

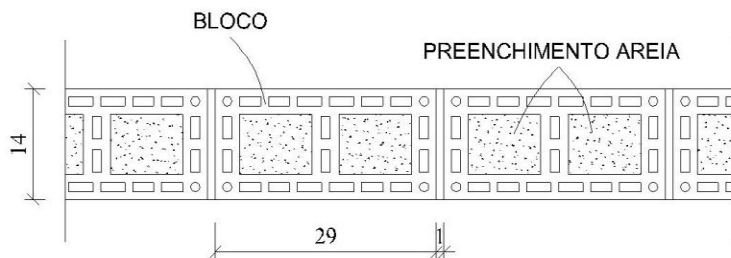


Figura 15 – Detalhe parede com preenchimento e sem revestimento.

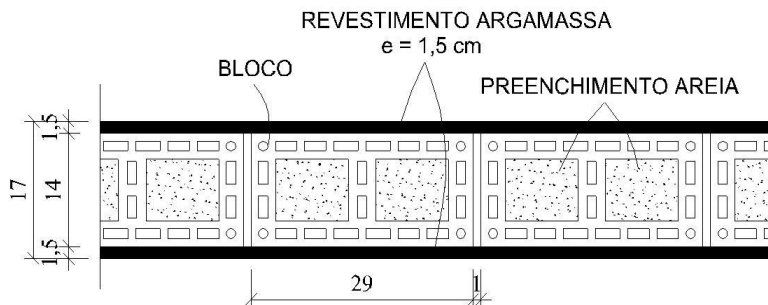


Figura 16 – Detalhe parede com preenchimento e com revestimento.

3.1.3 Disposição das paredes

De forma a proporcionar uma economia nos custos dos ensaios, as paredes foram testadas duas a duas, sendo posicionadas em frente uma da outra, distantes 75 cm entre si, tendo as laterais construídas também com o mesmo bloco cerâmico estrutural, constituindo um forno, conforme ilustrado nas Figuras 17 e 18. Na parte superior dos fornos, foi construída uma laje com vigotas pré-moldadas de concreto armado e lajotas cerâmicas, recobertas com uma capa de concreto, com espessura total de 11 cm. Nesta laje, foram deixadas três aberturas para a exaustão dos gases quentes e fumaça resultantes do ensaio.

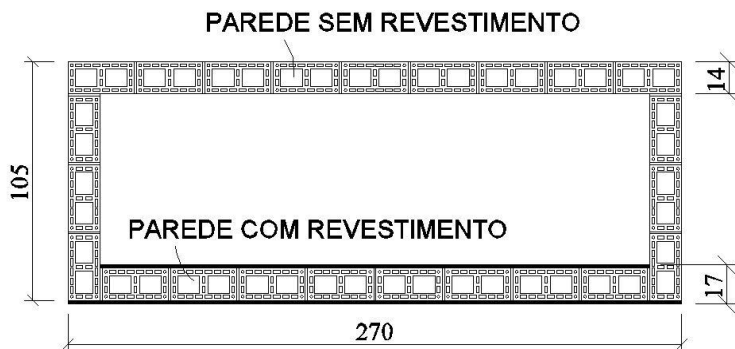


Figura 17 – Disposição das paredes sem preenchimento, em planta.

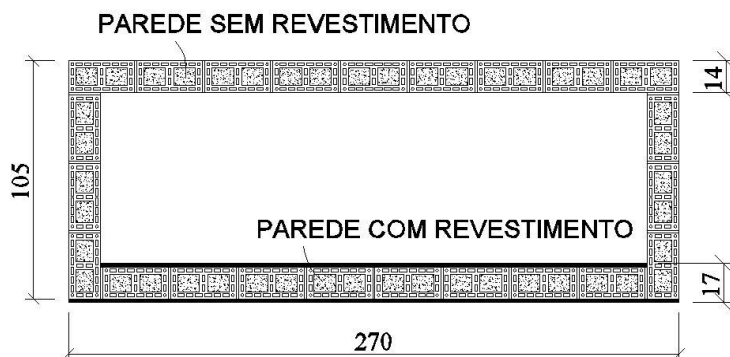


Figura 18 – Disposição das paredes com preenchimento, em planta.

Em cada forno, existiam quatro aberturas com dimensões de 15 cm × 20 cm, posicionadas na parte inferior, a uma altura de 20 cm do piso. Em frente às aberturas, foram posicionados quatro queimadores a gás, tendo sido dispostos um em cada face do forno, conforme a Figura 19.

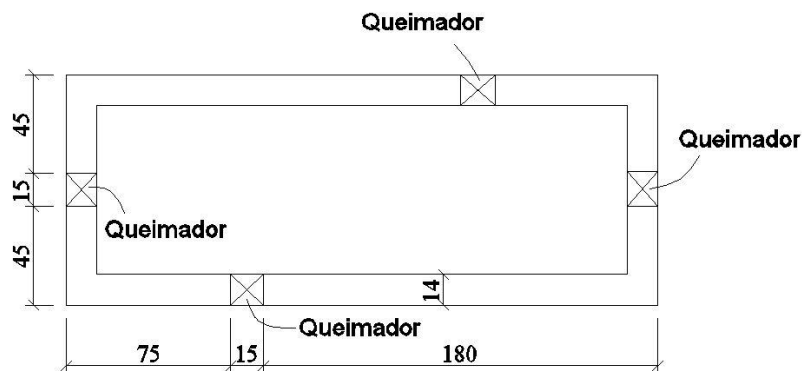


Figura 19 – Posicionamento em planta dos queimadores.

Os queimadores utilizados eram de aço, em chapas cilíndricas, tendo sido fabricados por funcionários da Cerâmica Constrular, com experiência em queimadores para fornos de material cerâmico. Foi utilizado como combustível o gás liquefeito de petróleo (GLP), o qual era alimentado por 2 botijões com capacidade de 45 kg para cada queimador, através de uma tubulação de cobre, com um registro para o controle manual da saída de gás, conforme ilustrado pelas Figuras 20 e 21.



Figura 20 – Queimador a gás.



Figura 21 – Botijões de GLP com registro.

3.1.4 Instrumentação dos ensaios

Os ensaios foram instrumentados por termopares para leitura das temperaturas no interior do forno e da face não exposta das paredes, e por um deprimômetro. Para a medição da temperatura no interior do forno, para cada forno, foram utilizados 5 termopares do tipo K, com faixa de trabalho de temperaturas entre 0 e 1200 °C, com fios termopares de diâmetro 1,5 mm e de comprimento de 300 mm, com isolamento mineral (Figura 22). Eles foram dispostos simetricamente em apenas uma das paredes, sendo que a medição da temperatura foi realizada em pontos afastados a 10 cm da face interna da parede.

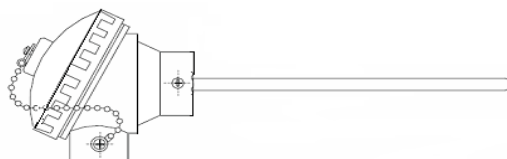


Figura 22 – Termopar para registro da temperatura no interior do forno.

A medição externa da temperatura da parede foi realizada por 5 termopares do tipo K com diâmetro 2×24 AWG (0,50 mm), flexível, com isolamento dos condutores em silicone, posicionados um no centro da parede e os demais no centro de cada quadrante da parede. As extremidades expostas dos fios termopares foram fixadas no centro de dois discos de alumínio, de espessura 0,50 mm, sendo recobertos com uma tira de couro, para isolamento térmico. Para a aquisição dos dados fornecidos pelos termopares, foi utilizado o equipamento denominado Data Acquisition Control Unit - Unidade de aquisição de dados, marca Agilent Technologies, modelo 34970A. Os valores de temperatura fornecidos pelos termopares foram registrados em intervalos de 5 minutos, até que a temperatura média da face atingisse 140 °C ou 180 °C em qualquer ponto.

Para o controle da pressão dos gases no interior do forno, foi utilizado um deprimômetro, conforme visualizado na Figura 23, sendo inserida a sua haste no interior do forno, através de uma abertura realizada na parede lateral.



Figura 23 – Deprimômetro.

A Figura 24 ilustra o posicionamento dos queimadores e dos termopares utilizados para a medição da temperatura durante os ensaios.

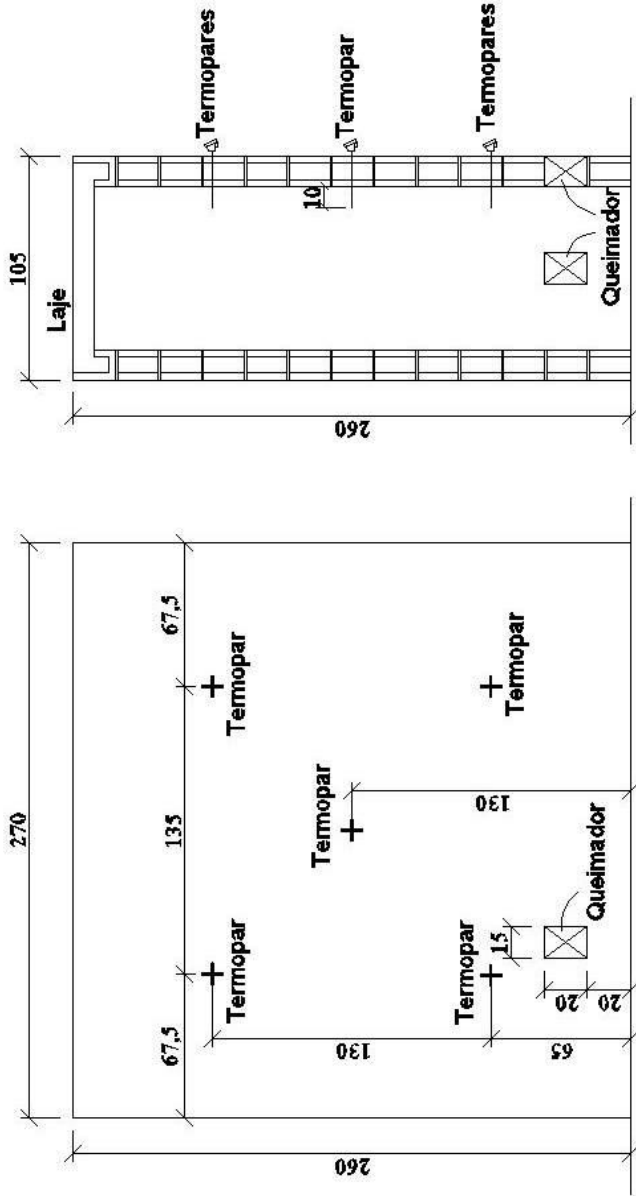


Figura 24 - Vista frontal e corte transversal do forno, com unidades em cm.

Os ensaios foram realizados sem o carregamento externo às paredes prescrito pela NBR 5628 (ABNT, 2001), devido à complexidade e aos custos decorrentes da aplicação de um carregamento elevado. Esta simplificação fez com que, provavelmente, as deformações e os deslocamentos transversais das amostras no decorrer do ensaio ocorressem em menor intensidade do que em ensaios em que fosse aplicado o carregamento exigido pela norma, além de alterar o grau de fissuração das amostras (BUCHANAN, 2002). Assim, o controle do tempo em que os requisitos de resistência mecânica e de estanqueidade da parede continuavam a ser atendidos foi prejudicado, não fornecendo resultados conclusivos acerca da resistência ao fogo em relação a tais requisitos. Desse modo, o valor obtido nos ensaios de resistência ao fogo corresponde apenas ao tempo em que o requisito de isolamento térmico é atendido.

Embora se considere a resistência ao fogo em relação apenas ao isolamento térmico, provavelmente, o valor obtido continuaria significativo, pois, conforme observado por diversos autores, o critério determinante do ensaio de resistência ao fogo, geralmente, é o do isolamento térmico, ocorrendo antes dos critérios de resistência mecânica e de estanqueidade (BEALL, 1995; BRICK INDUSTRY ASSOCIATION, 2008).

Como não foram aplicados carregamentos sobre as amostras, não foi usada instrumentação para o controle das deformações ocorridas no plano da parede, dos deslocamentos transversais e da fissuração, sendo efetuado apenas um controle visual, sendo medidas as dimensões das fissuras com um paquímetro.

3.1.5 Processo de aquecimento

O início do ensaio foi determinado pela ignição dos queimadores a gás, fornecendo calor para o aquecimento dos gases no interior do forno. O programa térmico utilizado para controlar a temperatura dos gases no interior do forno foi a curva-padrão temperatura-tempo definida pela Equação (17), conforme a NBR 5628 (ABNT, 2001).

As leituras das temperaturas foram realizadas em intervalos de 5 minutos. Conforme o valor medido, os registros de passagem de gás dos queimadores eram manualmente abertos ou fechados, de modo a efetuar o ajuste da temperatura do forno de acordo com a curva de aquecimento.

3.1.6 Critérios para a determinação da resistência ao fogo

Como não foram aplicados carregamentos sobre as amostras de paredes, a resistência ao fogo da parede foi determinada pelo tempo de ensaio em que o requisito de isolamento térmico continuou sendo atendido, o qual foi verificado por meio do controle da temperatura da face da parede não exposta ao fogo, até que a temperatura da face atingisse 140 °C na média ou 180 °C em qualquer ponto.

Embora não conclusivo, devido à falta de carregamento, foi controlado também o requisito de estanqueidade, por meio da inflamação de um chumaço de algodão, quando este era aproximado diante das fissuras das paredes por pelo menos 10 segundos, conforme estabelece a NBR 5628 (ABNT, 2001).

Quanto ao requisito de resistência mecânica, como não foram aplicados carregamentos sobre a parede e não foram instalados instrumentos para a medição de deformações ou deslocamentos excessivos, não foi possível verificar o tempo em que as amostras atendiam a tal requisito.

3.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa secção serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de determinação da resistência ao fogo, segundo as prescrições da NBR 5628 (ABNT, 2001), de 4 configurações de paredes de blocos cerâmicos estruturais, com dimensões de 2,70 m de largura e 2,60 m de altura.

3.2.1 Parede sem preenchimento e sem revestimento

Curva de aquecimento

A Figura 25 ilustra a temperatura média da curva de aquecimento à qual as paredes sem preenchimento, com e sem revestimento, foram submetidas e a curva especificada pela norma NBR 5628 (ABNT, 2001). As temperaturas registradas nos 5 termopares instalados no interior do forno são apresentadas no Apêndice C. Este ensaio teve duração de 3 horas e 20 minutos, sendo atingida a temperatura média

máxima de 1115,0 °C. A diferença entre a área sob a curva da temperatura média no interior do forno e a área sob a curva de temperatura padrão foi de cerca de 11% aos 30 min, e de cerca de 5% até o final do ensaio, estando dentro da margem de tolerância permitida pela norma.

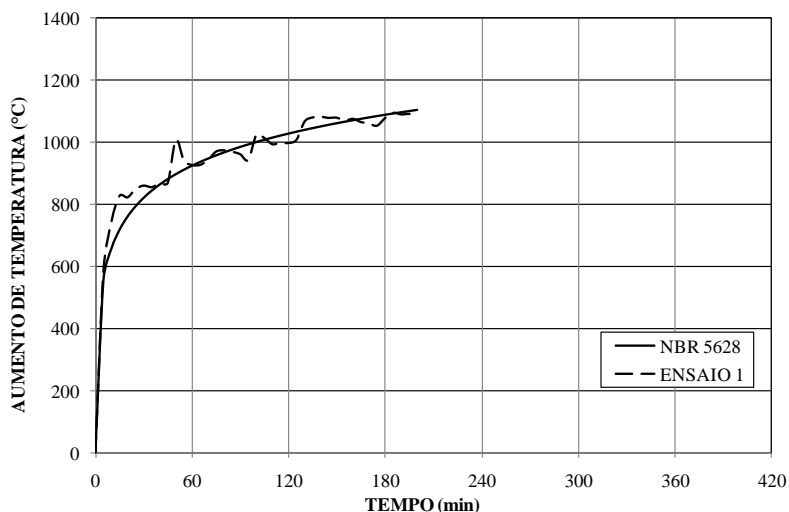


Figura 25 - Temperatura no interior do forno para as paredes sem preenchimento.

Evolução da temperatura da parede

A Figura 26 ilustra a média das temperaturas na face da parede não exposta ao fogo dos 5 termopares da parede sem revestimento e sem preenchimento. Observa-se que, nos 15 minutos iniciais do ensaio, a temperatura na face não exposta ao fogo permaneceu inalterada. A partir desse ponto, a face não exposta teve sua temperatura aumentada a uma taxa praticamente constante de cerca de 1,6 °C/min, fato evidenciado pelo formato aproximadamente linear da curva de evolução de temperatura. A face não exposta ao calor atingiu 140 °C após 106 minutos de ensaio. As temperaturas obtidas em cada um dos pontos medidos estão disponíveis no Apêndice D.

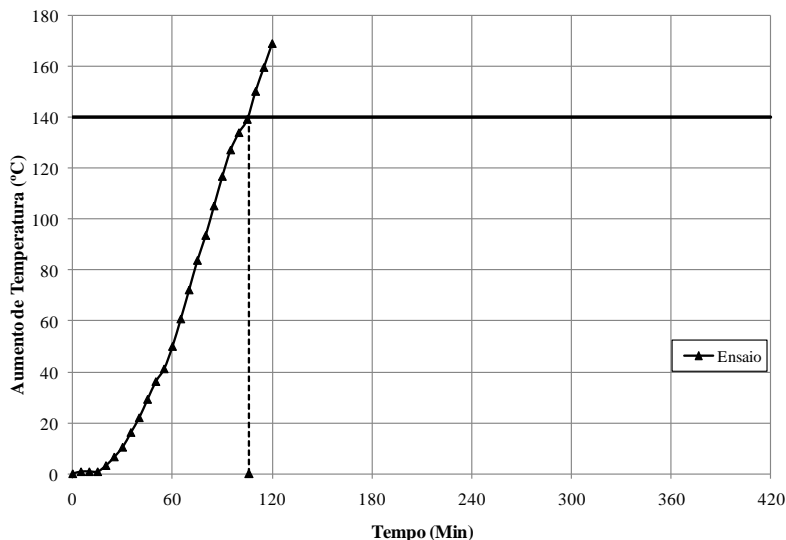


Figura 26 - Curva do aumento de temperatura na face não exposta da parede sem revestimento e sem preenchimento.

Integridade da parede

Durante o ensaio a parede apresentou poucas fissuras visíveis, sendo todas de dimensão inferior a 2 mm (Figuras 27 e 28). A principal fissura foi verificada após decorridos 28 minutos de ensaio e está ilustrada na Figura 29. Visualmente, também não foram verificados deformações ou deslocamentos transversais significativos, bem como qualquer outro sinal de comprometimento da estabilidade estrutural da parede. Também apresentou boa estanqueidade, devido a não ignição do chumaço de algodão, quando aproximado das fissuras da parede. No entanto, devido ao não carregamento da parede e à não utilização de instrumentos para controle de deformações, não podem ser obtidas conclusões definitivas sobre estanqueidade e estabilidade da parede.



Figura 27 - Parede sem revestimento e sem preenchimento no início do ensaio.



Figura 28 - Parede sem revestimento e sem preenchimento ao final do ensaio.



Figura 29 - Principal fissura ocorrida no ensaio.

Desempenho ao fogo da parede

O tempo de resistência ao fogo da parede de alvenaria construída com blocos cerâmicos, sem preenchimento e sem revestimento, considerando apenas o critério de isolamento térmico, foi de 106 minutos, classificando-se na classe 90 minutos de resistência ao fogo.

O valor obtido para a parede A é semelhante ao valor de resistência ao fogo de 100 minutos, obtido em ensaios realizados por Thomaz e Helene (2000), com blocos cerâmicos com largura de 140 mm.

Chichierchio (1990) também obteve, para paredes construídas com blocos cerâmicos de espessura de 140 mm, classes de resistência ao fogo de 90 minutos, embora não cite qual o tempo de resistência ao fogo obtido. Tal classificação é a mesma obtida nos ensaios por ora realizados.

Resultados de ensaios de resistência ao fogo realizados com blocos de concreto por Chichierchio (1990) e por Thomaz e Helene (2000) apresentaram tempos de 80 minutos de resistência ao fogo, e classe de resistência ao fogo de 60 minutos, para blocos de concreto com espessura de 140 mm. A resistência ao fogo obtida para os blocos cerâmicos mostrou que tais blocos, em comparação com os blocos de concreto, apresentam um desempenho ao fogo superior.

No entanto, como para cada parede somente uma amostra foi submetida ao ensaio de resistência ao fogo, as conclusões apresentadas nesta seção devem ser tratadas com cuidado, pois a falta de repetições dos experimentos pode levar a resultados que não representem o verdadeiro comportamento ao fogo das paredes.

3.2.2 Parede sem preenchimento e com revestimento

Evolução da temperatura da parede

A parede sem preenchimento e com revestimento de 1,5 cm de espessura, aplicado em ambas as faces, foi testada simultaneamente com a parede sem preenchimento e sem revestimento. A Figura 30 ilustra a evolução da temperatura média da face não exposta ao fogo da parede.

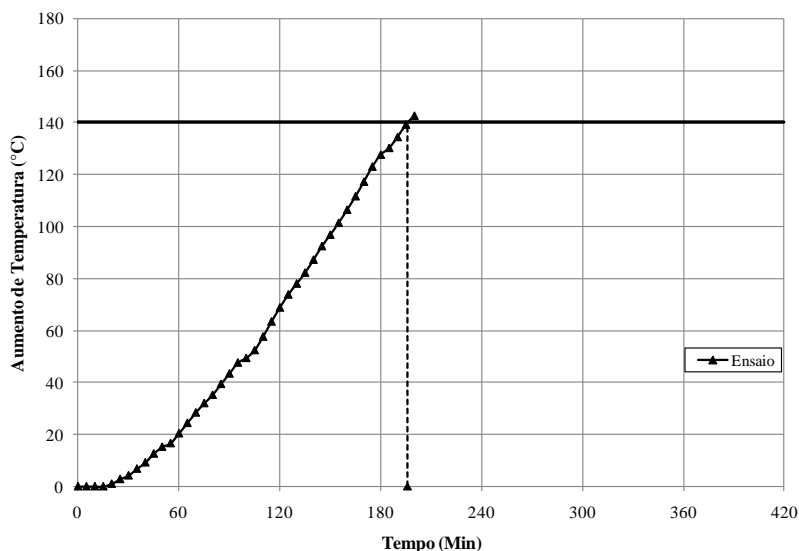


Figura 30 - Curva do aumento de temperatura na face não exposta da parede com revestimento e sem preenchimento.

A curva apresentou um comportamento muito semelhante ao ocorrido para parede sem revestimento e sem preenchimento. Foi observado um período inicial, com cerca de 15 minutos, onde a

temperatura permaneceu inalterada. Após esse período inicial, foi observado um crescimento a uma taxa praticamente constante de cerca de $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, menor do que a taxa encontrada para as paredes sem revestimento. A temperatura da face não exposta elevou-se até atingir o limite de $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, após 196 min do início do ensaio. As temperaturas lidas estão listadas no Apêndice D.

Integridade da parede

Embora a parede não tenha sofrido colapso ou ruína durante todo o período de ensaio, foram verificadas fissuras em maior quantidade e de maior dimensão do que na parede onde não foi utilizado revestimento, conforme ilustram as Figuras 31 e 32.

As fissuras começaram a surgir depois de decorridos apenas 6 minutos do início do ensaio, estendendo-se nas direções horizontal e vertical, sendo que a fissuração atingiu tanto a camada de revestimento e quanto o bloco e as juntas de assentamento. A principal fissura verificada foi de 18 mm, surgida aos 28 minutos de ensaio, permanecendo aproximadamente inalterada até o término do ensaio. Apesar das fissuras verificadas, não houve ignição do chumaço de algodão, quando aproximado das fissuras da parede.

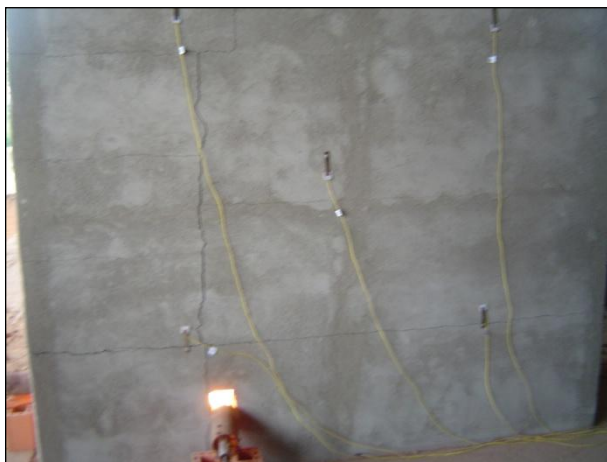


Figura 31 - Parede com revestimento no início da fissuração.



Figura 32 - Parede com revestimento ao final do ensaio, mostrando a localização da principal fissura.

Além da fissuração, foi possível verificar visualmente um deslocamento transversal da parede na direção contrária ao fogo. Este arqueamento na parede ocorre devido ao gradiente de temperatura entre as faces da parede, que gera dilatações térmicas diferentes entre as faces (NADJAI, 2006). O excessivo deslocamento transversal ocorrido certamente contribuiu para o aumento na fissuração, originando tensões de tração superiores à resistência à tração da argamassa.

Mesmo não ocorrendo a ruína da parede durante o ensaio, ressalta-se que as deformações e fissuras observadas provavelmente seriam aumentadas no caso de execução de ensaio com aplicação de carregamento nas amostras, elevando os carregamentos de 2ª ordem nas paredes, os quais poderiam levar a mesma à ruína.

Apesar das altas temperaturas a que foi submetida, a camada de revestimento no interior do forno não sofreu descolamento, conforme observado na desmontagem das paredes após o resfriamento.

Desempenho ao fogo da parede

O tempo de resistência ao fogo obtido no ensaio experimental, levando em conta apenas o critério do isolamento térmico, foi de 196 min. Para este valor, a classe de resistência ao fogo obtida é de 180 minutos (3 horas). Portanto, a existência de revestimento de argamassa nas faces da parede representou um aumento no valor da resistência ao

fogo de 85% na comparação com a parede sem revestimento, que apresentou resistência ao fogo de 106 minutos.

O aumento observado na resistência ao fogo das paredes é um valor significativo, principalmente porque tal aumento é conseguido sem elevar os custos de construção das obras, uma vez que os revestimentos nas faces da parede já seriam normalmente executados em praticamente todas as edificações.

Os ensaios realizados por Chichierchio (1990) também incluíram a realização de experimentos com paredes sem e com revestimento de argamassa nas faces da parede. Os resultados mostraram classes de resistência ao fogo de 120 minutos para paredes com revestimento, valor superior ao valor de 90 minutos obtido para as paredes sem revestimento nas suas faces.

3.2.3 Parede com preenchimento e sem revestimento

Curva de aquecimento

A Figura 33 ilustra a curva de temperatura dos gases no interior do forno obtida no ensaio das paredes com preenchimento, com e sem revestimento, e a curva recomendada pela NBR 5628 (ABNT, 2001). A duração total do ensaio foi de 6 horas e 45 minutos, tendo como temperatura média máxima registrada no interior do forno o valor de 1219,2 °C. As leituras de temperatura registradas nos 5 termopares instalados no interior do forno estão disponíveis no Apêndice C. Conseguiu-se um melhor controle na temperatura do forno em relação ao ensaio das paredes sem preenchimento. Verificou-se uma diferença entre a área sob a curva da temperatura média no interior do forno e a área sob a curva de temperatura padrão de cerca de 4% aos 30 min, e de cerca de apenas 1% até o final do ensaio, portanto dentro da margem de tolerância admitida pela norma.

Evolução da temperatura da parede

A parede com seus vazados principais preenchidos com areia média, sem revestimento nas faces, apresentou a evolução da temperatura média da face da parede não exposta ao calor mostrada na Figura 34. Os valores obtidos para a temperatura estão listados no Apêndice D.

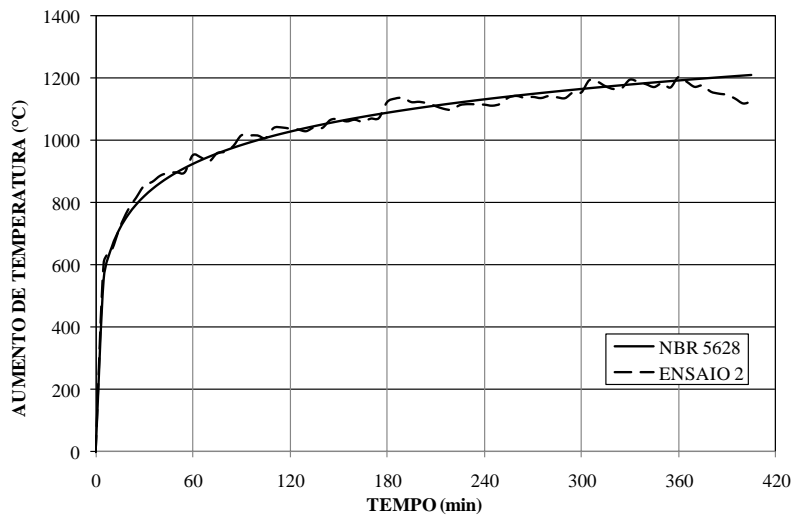


Figura 33 - Temperatura no interior do forno para as paredes com preenchimento.

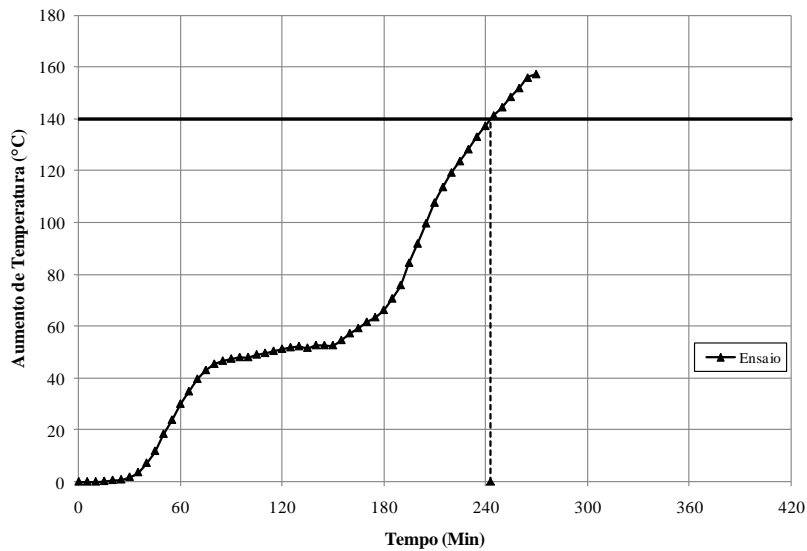


Figura 34 - Curvas do aumento de temperatura na face não exposta da parede sem revestimento e com preenchimento.

Na Figura 34, observa-se que, aproximadamente após 60 minutos do início ensaio, a temperatura da face da parede não exposta ao fogo permaneceu praticamente constante, gerando um patamar, por um período de cerca de 90 minutos. Durante este período, a temperatura da face não exposta estava ao redor de 70 °C, enquanto que na face exposta ao fogo a temperatura estava ao redor de 1000 °C. Embora não tenham sido instalados termopares no interior das paredes, devido à distribuição de temperatura ao longo da espessura da parede, estima-se que a temperatura no interior da parede estivesse provavelmente ao redor de 100 °C. Nesta faixa de temperatura, a maior parte do calor que atravessava a parede foi consumida para a evaporação da água contida nos blocos e, principalmente, na areia existente nos vazados, que é um material altamente higroscópico. Este fato fez com que a temperatura da face da parede sofresse um aumento muito reduzido, até que a umidade existente no interior da parede fosse totalmente evaporada. O patamar surgido na curva de aumento de temperatura contribuiu significativamente para o aumento da resistência ao fogo da parede.

O aparecimento do patamar nas curvas de temperatura foi constatado também por diversos autores (NGUYEN *et al*, 2009; AL NAHHAS *et al*, 2007; ALLEN; HARMATHY, 1972), os quais atribuíram a causa do aparecimento dos patamares à umidade existente no material do interior da parede de alvenaria, que consome o calor que atravessaria a parede até a evaporação completa da umidade (AL NAHHAS *et al*, 2007).

Após cerca de 150 minutos do início do ensaio, a temperatura da face não exposta voltou a aumentar, segundo uma taxa aproximada de cerca de 1,1 °C/min, até que o valor do aumento de temperatura atingisse o limite de 140 °C previsto pela NBR 5628 (ABNT, 2001), no tempo de 243 minutos após o início do ensaio.

Integridade da parede

Até o término do ensaio, a parede apresentou pouca fissuração, sendo que as primeiras fissuras surgiram somente após 40 minutos do início do ensaio. Não houve ignição do chumaço de algodão quando aproximado das fissuras, mostrando boa estanqueidade. Em relação à segurança estrutural, não houve ruína da parede, e, visualmente, não houve deformações ou deslocamentos significativos. Entretanto, não é possível concluir que os requisitos de estanqueidade e de resistência mecânica continuavam sendo atendidos pela parede, devido ao não

carregamento da parede. A Figura 35 mostra uma imagem da parede com preenchimento e sem revestimento durante o ensaio.



Figura 35 - Parede com preenchimento durante a exposição ao fogo.

Desempenho ao fogo da parede

A resistência ao fogo obtida, considerando somente o requisito do isolamento térmico, foi de 243 minutos, o que corresponde a uma classe de resistência ao fogo de 240 minutos. Comparando este resultado com o resultado obtido para a parede sem preenchimento dos vazados, que foi de 106 minutos, o preenchimento dos vazados representou um acréscimo de 129% na resistência ao fogo da parede.

Tal acréscimo na resistência ao fogo foi ainda superior àquele obtido com a aplicação de revestimentos de argamassa (85%). Portanto, o preenchimento dos vazados dos blocos com areia mostrou ser uma alternativa excelente para o incremento da resistência ao fogo de uma parede de alvenaria com blocos cerâmicos, uma vez que o custo de tal solução (material e mão de obra) é relativamente baixo.

Deve-se salientar que não foi efetuado o controle da umidade da areia utilizada para o preenchimento dos vazados no instante do ensaio, embora tenha se verificado que a umidade da areia, ao consumir calor para sua evaporação, contribuiu para o aumento na resistência ao fogo pelo critério de isolamento térmico.

3.2.4 Parede com preenchimento e com revestimento

Evolução da temperatura da parede

A Figura 36 mostra a evolução da temperatura média da face não exposta ao fogo da parede com preenchimento dos vazados e com revestimento aplicado em ambas as faces com espessura de 1,5 cm, que foi testada simultaneamente com a parede com preenchimento e sem revestimento. Os valores obtidos encontram-se no Apêndice D.

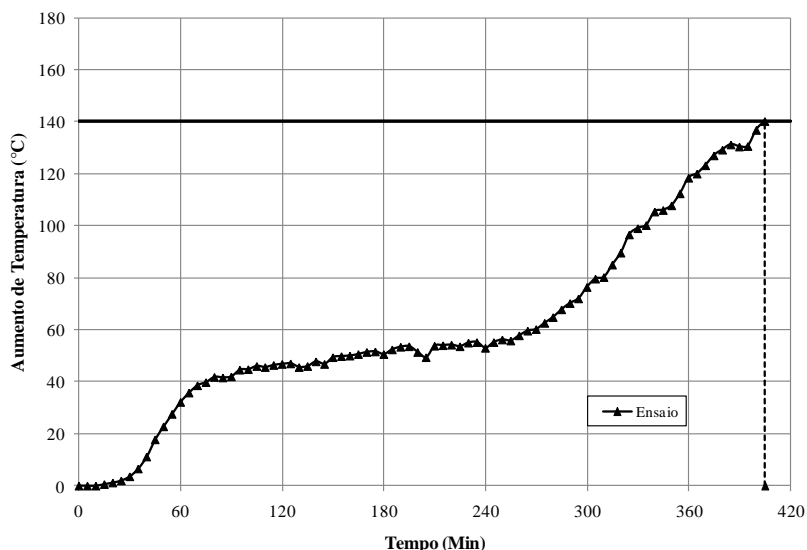


Figura 36 - Curva do aumento de temperatura na face não exposta da parede com revestimento e com preenchimento.

De modo semelhante ao ocorrido com a parede sem revestimento e sem preenchimento, a temperatura na face não exposta ao fogo também apresentou um período inicial de crescimento até cerca de 60 minutos após o início do ensaio e, após este período, a temperatura permaneceu constante, formando um patamar, devido à mudança de estado da água no interior da parede. A temperatura permaneceu aproximadamente constante por um período de cerca de 3 horas, e, após este período, a temperatura da face não exposta teve novo período de

crescimento linear a uma taxa aproximada de $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, até que o aumento de temperatura atingisse $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ aos 405 minutos do início do ensaio.

Integridade da parede

Durante o ensaio, a parede sofreu uma fissuração nos sentidos horizontal e vertical, sendo que as fissuras surgiram a partir dos 15 minutos iniciais. A principal fissura atingiu 20 mm de abertura, atingindo desde a camada de revestimento até os blocos, conforme mostram as Figuras 37 a 39. No entanto, não houve ignição do chumaço de algodão, quando aproximado das fissuras da parede.

Embora não se dispusesse de instrumentação para controle das deformações, verificou-se visualmente um deslocamento transversal acentuado da parede, provocando um arqueamento na direção contrária ao fogo, assim como ocorrido com a parede sem preenchimento e com revestimento, o qual contribuiu para a fissuração da parede. Não houve descolamento da camada de revestimento no interior do forno, apesar das altas temperaturas a que foi submetida.

Mesmo com o deslocamento e a fissuração ocorridos, a parede não sofreu colapso ou ruína durante o período de ensaio. Contudo, não se pode afirmar que a parede atendeu ao requisito de resistência mecânica, uma vez que não foram aplicados carregamentos na amostra e não foram utilizados instrumentos para controle das deformações.



Figura 37 - Parede com revestimento e com preenchimento no início do ensaio.

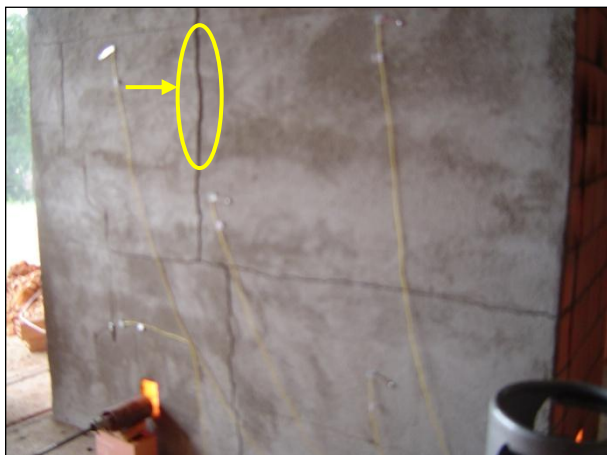


Figura 38 - Parede com revestimento e com preenchimento ao final do ensaio, com a localização da principal fissura.

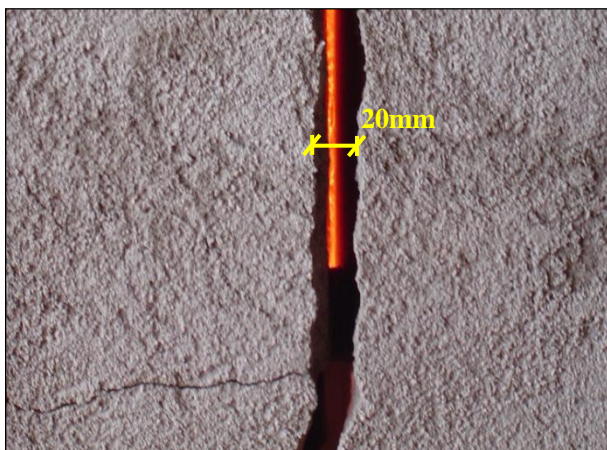


Figura 39 - Detalhe da principal fissura ocorrida na parede com revestimento e com preenchimento.

Desempenho ao fogo da parede

Considerando-se apenas o critério de isolamento térmico, a resistência ao fogo obtida foi de 405 minutos, enquadrando a parede na classe de resistência ao fogo de 360 minutos.

O valor obtido mostrou que as paredes de alvenaria com blocos cerâmicos possuem uma ótima resistência ao fogo, considerando somente o critério de isolamento térmico, podendo ser utilizadas em situações onde um alto nível de resistência ao fogo é exigido, utilizando soluções simples como os revestimentos de argamassa e o preenchimento no interior dos vazados dos blocos.

Efetuada uma comparação do valor obtido com a parede com preenchimento e com revestimento, de 405 minutos, com o valor obtido com a parede apenas com preenchimento, de 243 minutos, pode-se verificar um ganho de resistência ao fogo pelo critério de isolamento térmico de 67%, obtido com a aplicação de revestimento de argamassa nas faces, para as paredes com preenchimento no interior dos vazados. Este valor é muito semelhante ao obtido com a aplicação de revestimento de argamassa, no caso das paredes sem preenchimento no interior de seus vazados, onde o ganho de resistência foi de 85%. Desta forma, comprovou-se a eficácia da aplicação de revestimentos de argamassa como alternativa para a melhoria do desempenho ao fogo de uma parede de alvenaria, já que o aumento na resistência ao fogo verificado nas duas comparações foi superior a 60%.

Comparando-se o valor obtido para a parede com preenchimento e com revestimento, de 405 minutos, com o valor obtido no ensaio com a parede com revestimento, porém sem preenchimento nos vazados, de 196 minutos, foi verificado um aumento na resistência ao fogo pelo critério de isolamento térmico de 107%. Este aumento conseguido com o preenchimento dos vazados, no caso de paredes com revestimento de argamassa nas faces, assemelha-se ao ganho de 129% obtido com o preenchimento dos vazados, no caso das paredes sem revestimento nas faces. Desse modo, nas duas comparações realizadas, o preenchimento dos vazados do interior dos blocos com areia representou uma melhoria de pelo menos 100% na resistência ao fogo das paredes de alvenaria ensaiadas.

Por fim, comparando os resultados obtidos para a parede sem revestimento nas faces e sem preenchimento nos vazados, de 106 min, com os resultados obtidos para a parede com revestimento e com preenchimento, de 405 min, foi observado um aumento da ordem de 282%. O aumento verificado é superior ao valor do somatório do aumento obtido com o uso somente de revestimentos de argamassa, de cerca de 80%, com o aumento obtido com a utilização somente de preenchimento no interior dos vazados dos blocos com areia, que foi superior a 100%.

3.2.5 Análise comparativa do desempenho térmico das paredes

A Figura 40 mostra as curvas de aumento da temperatura da face não exposta ao calor das paredes submetidas ao ensaio, com a finalidade de facilitar a comparação do desempenho térmico destas paredes em situação de incêndio.

Comparando as curvas de aumento da temperatura das paredes sem preenchimento mostradas na Figura 40, pode-se observar que a curva de temperatura da parede com revestimento em ambas as faces apresenta uma inclinação menor do que a curva da parede que não possui revestimento. A menor inclinação da curva significa uma taxa de crescimento menor de temperatura na face não exposta ao fogo, devido ao aumento no isolamento térmico da parede, proporcionado pelas camadas de revestimento. Dessa forma, a parede com revestimento levou mais tempo para apresentar uma variação de 140 °C na face não exposta ao calor, mostrando que a utilização de revestimentos de argamassa nas faces da parede aumenta a sua resistência ao fogo.

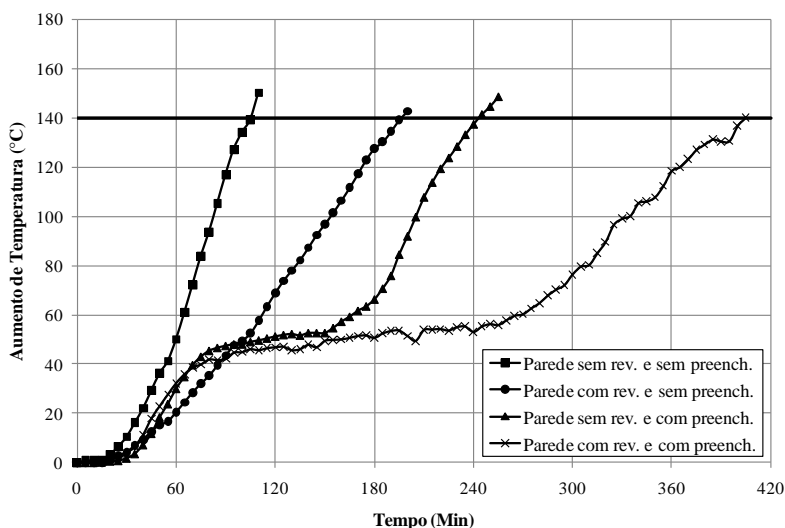


Figura 40 - Temperatura na face não exposta das paredes obtida em ensaios.

A mesma conclusão pode ser obtida comparando as curvas de aumento de temperatura das paredes com enchimento nos vazados. A curva da parede com revestimento está com uma inclinação menor que a

parede sem revestimento, o que indica um maior isolamento térmico e, desse modo, maior resistência ao fogo, devido à existência de revestimentos em suas faces.

Também se pode observar o efeito do preenchimento do interior dos vazados dos blocos com areia, que resultou em um aumento na resistência ao fogo das paredes. As curvas obtidas para as paredes com preenchimento, além de apresentarem uma taxa de crescimento da temperatura menor do que as paredes sem preenchimento, apresentam um patamar, na parte intermediária de seus ensaios, em que a temperatura permaneceu praticamente constante, conforme se observa na Figura 40. Este patamar, devido ao consumo de parte do calor que atravessou a parede para a mudança de fase da umidade contida na areia, possibilitou às paredes com preenchimento um aumento no tempo necessário para que a temperatura da face não exposta atingisse o limite do isolamento térmico do ensaio.

Por fim, ainda na Figura 40, comparando-se a curva de aumento de temperatura da parede sem revestimento e sem preenchimento com a curva da parede com revestimento e com revestimento, pode-se verificar a significativa melhoria no desempenho ao fogo das paredes devido à utilização de revestimento de argamassa nas faces e pelo preenchimento dos vazados dos blocos com areia.

3.3 CONCLUSÕES PARCIAIS

Os ensaios foram realizados em paredes com dimensões de 2,70 m de largura e 2,60 m de altura, construídas com blocos cerâmicos de 14 cm \times 19 cm \times 29 cm e resistência mecânica à compressão nominal de 9 N/mm², sendo testadas paredes em 4 diferentes configurações: sem revestimento e sem preenchimento; com revestimento nas faces interna e externa; com enchimento nos vazados; e com revestimento e com enchimento. Todos os ensaios foram conduzidos segundo as prescrições da NBR 5628 (ABNT, 2001). Como os ensaios foram realizados sem aplicação de carregamentos, as conclusões obtidas referem-se somente a resistência ao fogo pelo requisito de isolamento térmico.

A parede de blocos cerâmicos sem preenchimento nos vazados e sem revestimento nas faces apresentou resistência ao fogo pelo critério de isolamento térmico de 106 minutos, valor superior a resistência ao fogo de blocos de concreto, permitindo que esta parede seja utilizada em

diversas situações onde sejam exigidas classes de resistência ao fogo mínima de 90 minutos.

A resistência ao fogo pelo isolamento térmico obtida para a parede com revestimento de argamassa de cimento, cal e areia média, em ambas as faces, foi de 196 minutos, representando um aumento superior a 80%. Já para a parede com os vazados dos blocos preenchidos com areia, a resistência ao fogo pelo requisito de isolamento térmico encontrada foi de 243 minutos, o qual equivale a uma melhoria de pelo menos 100% na resistência ao fogo das paredes. Desse modo, comprovou-se que o revestimento das faces com argamassa e o preenchimento com areia representam boas alternativas para a melhoria do desempenho ao fogo das paredes de alvenaria.

Por fim, a parede confeccionada com preenchimento dos vazados e com revestimento de argamassa apresentou uma resistência ao fogo pelo critério de isolamento térmico de 405 minutos, valor que possibilita a utilização das paredes de alvenaria com blocos cerâmicos em edificações que exijam uma alta resistência ao fogo.

Em relação à estanqueidade e à resistência mecânica da parede, verificou-se que as paredes sem revestimento, tanto sem quanto com preenchimento nos vazados, apresentaram um bom desempenho, uma vez que, visualmente, ocorreram poucas fissuras e pequenas deformações. Já nas paredes com revestimento, tanto sem e com preenchimento, foram verificadas fissuras e deslocamentos transversais elevados, que poderiam comprometer a resistência ao fogo da mesma, embora não tenha havido ruína da parede, nem tenha ocorrido a ignição do chumaço de algodão.

No entanto, a falta de carregamento nas amostras, que implicaria no aumento das fissuras e das deformações, e a falta de instrumentação para controle dos deslocamentos, que permitiria controlar o nível de deformações das paredes, impedem que os resultados de resistência ao fogo sejam conclusivos acerca dos critérios de estanqueidade e de resistência mecânica, ficando os resultados restritos apenas ao requisito de isolamento térmico.

Não foram obtidas conclusões acerca da causa do aumento da fissuração ocorrido nas paredes com revestimento, ainda que a utilização destes tenha elevado significativamente o isolamento térmico das paredes com blocos cerâmicos.

Como sugestão para futuras pesquisas, podem ser realizados ensaios alterando algumas características construtivas das paredes. A influência do tipo do bloco pode ser avaliada, realizando ensaios sobre

blocos de diferentes resistências, tais como 6, 12 e 15 N/mm², e também blocos de outros fornecedores, com geometrias diferentes.

Outras pesquisas poderiam abranger a utilização de revestimentos de diferentes espessuras, ou ainda revestimentos com outros materiais, tais como o gesso. Pode ser verificada também a influência da utilização de outro material, além da areia, para o preenchimento do interior dos vazados dos blocos, como escória, argila expandida, perlita e vermiculita, os quais possuem propriedades isolantes, bem como ensaios em que seja efetuado o controle da umidade da areia.

Neste mesmo sentido, também podem ser conduzidos estudos em que os ensaios de resistência ao fogo são realizados com a aplicação de carregamentos sobre as paredes, pois, sob tais condições, as fissuras e as deformações devem ser aumentadas, o que elevaria o risco de ruína da amostra. Juntamente com os carregamentos, também poderia ser empregada instrumentação para controle das fissuras, deformações e deslocamentos transversais surgidos nas amostras de paredes. Tais medidas fariam com que os resultados de resistência ao fogo considerassem também, além do isolamento térmico, os requisitos de estanqueidade e estabilidade estrutural.

4. PROGRAMA NUMÉRICO-ANALÍTICO

Além da parte experimental, o presente estudo abrangeu também a determinação da resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos através de dois métodos de cálculo: o método analítico de cálculo do Brick Industry Association e o método numérico por meio de elementos finitos. Neste capítulo, serão apresentadas as considerações efetuadas para a utilização destes métodos, os resultados obtidos e as conclusões parciais.

4.1 MÉTODO DO BRICK INDUSTRY ASSOCIATION

Para a determinação da resistência ao fogo das paredes por meio do método de cálculo do Brick Industry Association (2008), inicialmente, foi calculada a espessura equivalente da parede, a partir da espessura real e da porcentagem de sólidos dos blocos cerâmicos.

Para as paredes com preenchimento de areia nos vazados dos blocos, a porcentagem de vazados preenchidos foi somada à porcentagem de material sólido dos blocos cerâmicos. Além disso, foram considerados os acréscimos na espessura equivalente no caso da existência de revestimento de argamassa nas faces das paredes.

Com base no valor da espessura equivalente de cada parede, foi calculada a sua resistência ao fogo, mediante interpolação dos dados tabelados, conforme a metodologia descrita pelo Brick Industry Association (2008).

4.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Para a modelagem numérica por meio do método dos elementos finitos, foi utilizado o programa CAST3M, desenvolvido no Departamento de Mecânica e Tecnologia (DMT) do Commissariado de Energia Atômica (CEA) da França, empregado para a discretização espacial da seção transversal do elemento estrutural. Para a discretização no tempo, foi utilizado o método de integração direta Dupont II, que pertence à família de algoritmos de dois passos de tempo, não-iterativa,

apresentando uma precisão de segunda ordem no tempo (BATHE, 1996).

Devido à complexidade da transferência de calor no interior da parede, que envolve transporte de massa no interior do meio poroso parcialmente saturado, reações químicas endo e exotérmicas e mudanças de fases, uma modelagem completa do fenômeno exigiria muito tempo, grande capacidade computacional e os dados relativos a todos os fenômenos envolvidos, assim sendo, foi adotada uma modelagem simplificada bidimensional.

4.2.1 Hipóteses simplificadoras

A análise da propagação de calor através da parede foi realizada considerando, para cada configuração de parede ensaiada, apenas um bloco, não sendo consideradas as juntas de argamassa utilizadas para o assentamento dos blocos. Também não foi considerado o possível efeito das demais paredes constituintes do forno preparado para o ensaio, as quais se encontram próximas das paredes ensaiadas.

Para o aquecimento da parede, considerou-se a convecção e radiação entre os gases quentes do interior do forno e a face exposta da parede, supondo-se que a temperatura atuante na face da parede fosse uniforme. Foi adotada para a temperatura dos gases aquecidos a curva-padrão temperatura-tempo definida pela NBR 5628 (2001), representada na Equação (17).

Para a transferência de calor no interior da parede, foi adotado o modelo de condução de calor através dos materiais sólidos que compunham a parede: cerâmica, argamassa e areia. Por fim, considerou-se a perda de calor por radiação e convecção na face não exposta ao fogo para o ar a temperatura ambiente, considerada uniforme em toda a face da parede.

Não foi considerada no modelo a transmissão de calor por convecção e radiação no interior dos vazados dos blocos, quando estes não se encontravam preenchidos. Para corrigir tal deficiência do modelo, a qual resultaria em temperaturas menores na face não exposta, foi adotada a condutividade térmica efetiva do bloco cerâmico, obtida por meio do ajuste das propriedades a partir dos resultados experimentais.

A Figura 41 ilustra a modelagem térmica adotada para o cálculo da transferência de calor por meio do método de elementos finitos.

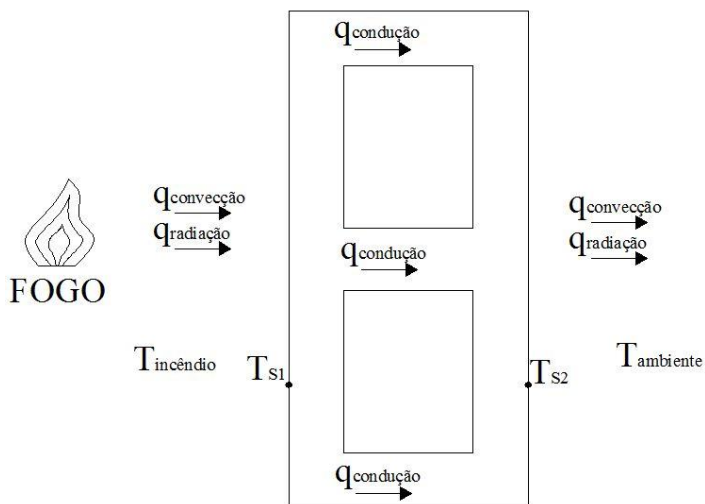


Figura 41 – Esquema da transferência de calor em uma parede submetida a incêndio.

Embora o modelo adotado também não contemple diretamente a mudança de fase devido à evaporação da umidade presente nos poros dos materiais constituintes da parede, tal fenômeno foi considerado pela modificação da capacidade calorífica dos materiais para temperaturas próximas a 100 °C.

4.2.2 Configurações geométricas adotadas

As quatro configurações de parede ensaiadas foram modeladas utilizando-se elementos finitos do tipo TRI6 (elemento triangular de 6 nós). Porém, os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos dependem diretamente do número de elementos que formam a malha utilizada no modelo. Entretanto, embora aumente a precisão dos resultados, um aumento no refinamento da malha eleva o tempo de processamento do modelo. Portanto, a malha utilizada na modelagem deve oferecer resultados satisfatoriamente precisos, sem que tenha ocorrido um refinamento excessivo da malha.

Desse modo, realizou-se um estudo de refinamento da malha para a parede sem revestimento e sem preenchimento, a fim de adotar uma malha que possuía refinamento suficiente. Foram testadas malhas com

diferentes números de elementos, verificando a temperatura no centro da face não exposta da parede após 2 horas de aquecimento. Os resultados apontaram uma convergência dos valores em 169,6 °C, conforme mostra a Figura 42.

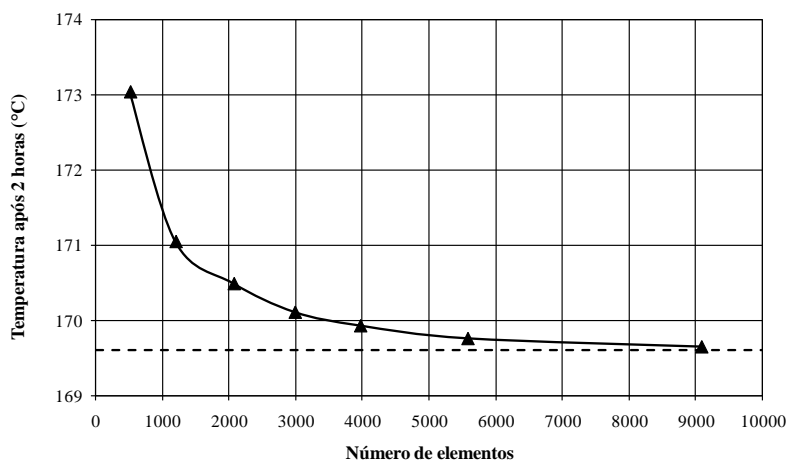


Figura 42 – Estudo de refinamento de malha.

A malha com 2070 elementos apresentou temperatura de 170,5 °C, o que representa um erro de apenas 0,5% em relação ao valor da convergência. Desse modo, optou-se por adotar no modelo a malha com 2070 elementos, uma vez que possui um nível de refinamento adequado, fornecendo precisão satisfatória aos resultados, sem implicar em custo computacional elevado.

O fenômeno de transferência de calor através da parede foi considerado modelando-se apenas um bloco que compõe a referida parede. A malha representando a parede sem revestimento e sem preenchimento possui 2070 elementos (Figura 43), a que representa a parede com revestimento em ambas as faces possui 2426 elementos (Figura 44), a que representa a parede sem revestimento e com preenchimento com areia nos vazados principais possui 2514 elementos (Figura 45), e a malha representando a parede com revestimento e com preenchimento possui 2870 elementos (Figura 46).

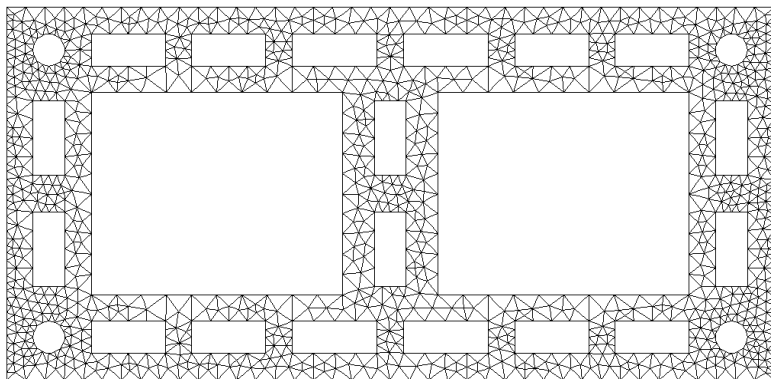


Figura 43 - Malha representando a parede sem revestimento e sem preenchimento.

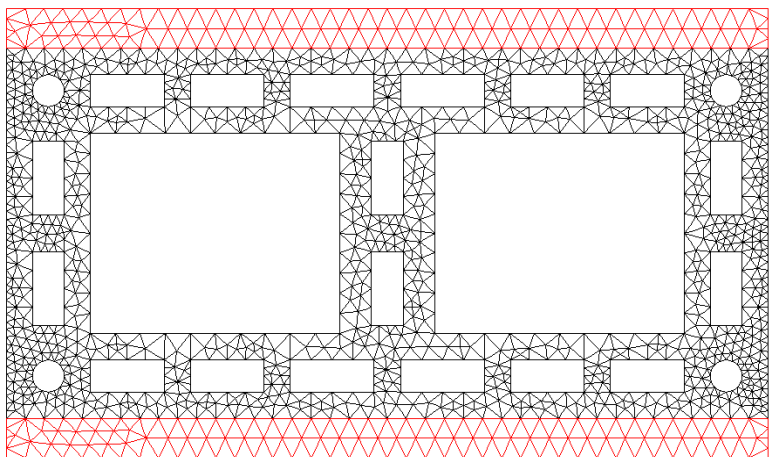


Figura 44 - Malha representando a parede com revestimento em ambas as faces.

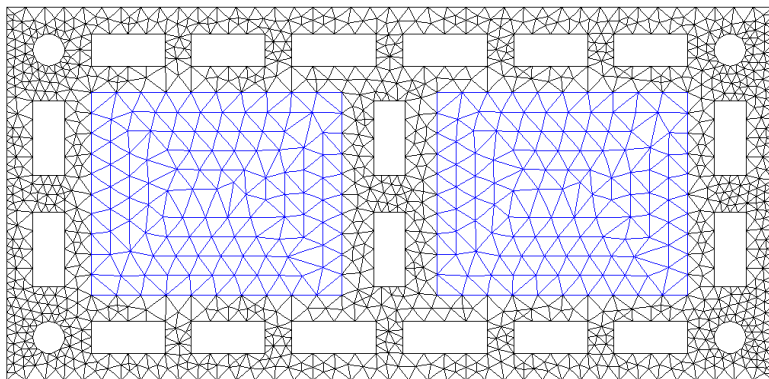


Figura 45 - Malha representando a parede com preenchimento com areia.

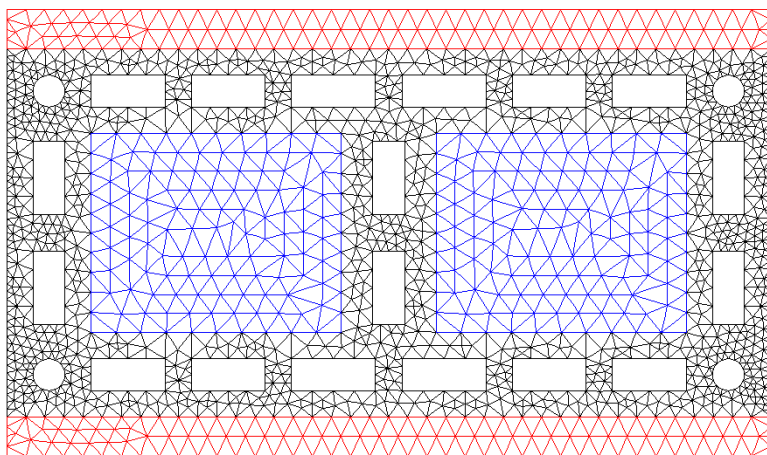


Figura 46 - Malha representando a parede com revestimento e com preenchimento.

4.2.3 Calibração do modelo numérico

Para a realização da modelagem numérica de transferência de calor, é necessário conhecer as propriedades termofísicas apresentadas na seção 2.2.3, referentes ao ar, argamassa, bloco cerâmico e areia. Como tais propriedades não foram determinadas experimentalmente

nesta pesquisa, estes dados somente poderiam ser obtidos junto à literatura.

Contudo, a literatura disponível sobre o assunto apresenta uma dispersão muito grande nos valores das propriedades, principalmente em relação à condutividade térmica. Além disso, a maior parte dos valores presentes na literatura referem-se às propriedades dos materiais à temperatura ambiente, não fornecendo valores destas propriedades em temperaturas elevadas, que ocorrem durante o ensaio de resistência ao fogo. Adicionalmente, os materiais envolvidos são porosos, retendo umidade em seu interior, a qual aumenta a condutividade térmica efetiva do bloco e consome grande quantidade de calor para sua evaporação.

Devido à grande variabilidade dos valores das propriedades existentes na literatura, portanto, a escolha de diferentes valores dentre os valores da literatura pode levar a resultados muito diferentes no cálculo da transferência de calor por meio do método dos elementos finitos.

Desse modo, neste trabalho, foi realizada uma calibração do modelo numérico com base nos resultados experimentais obtidos nos ensaios de determinação de resistência ao fogo. A calibração do modelo foi conseguida a partir da escolha de valores das propriedades térmicas dos materiais que proporcionassem o melhor ajuste possível entre as curvas de temperatura experimental e numérica.

Para auxiliar na escolha dos valores das propriedades, inicialmente, foi realizado um estudo paramétrico da transferência de calor da parede sem preenchimento e sem revestimento, variando a condutividade térmica, o calor específico e a massa específica, a fim de avaliar a influência de cada propriedade na transferência de calor.

4.2.4 Análise paramétrica da transferência de calor

Para as paredes executada sem preenchimento nos vazados e sem revestimento de argamassa nas faces, simulou-se a variação do aumento da temperatura da face não exposta da parede em função das propriedades do material do bloco cerâmico, sendo testada a influência da condutividade térmica, do calor específico e da massa específica.

Condutividade térmica

A Figura 47 ilustra a influência da variação da condutividade térmica na temperatura da face não exposta ao fogo. Para esta análise, a condutividade térmica foi variada em um intervalo com ponto central de 2 W/m.K , utilizando valores da ordem de 10 e 20% superiores e inferiores ao valor central. O calor específico foi mantido fixo em 700 J/kg.K e a massa específica foi mantida constante em 1750 kg/m^3 .

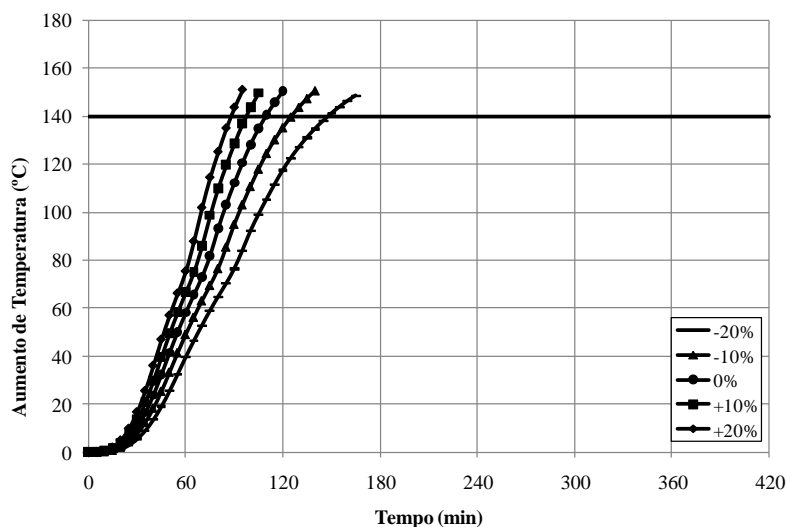


Figura 47 - Evolução de temperatura para diferentes condutividades térmicas.

Na Figura 48, mostra-se a variação da resistência ao fogo pelo critério de isolamento térmico em função da condutividade térmica do material do bloco. Constatou-se que o aumento da condutividade térmica causa uma diminuição no tempo de resistência ao fogo, seguindo uma curva não linear. Para valores mais baixos, um aumento de 10% na condutividade térmica acarreta em uma diminuição de cerca de 15% na resistência ao fogo. Porém, para valores maiores, esta influência vai sendo atenuada, sendo que um aumento de 10% na condutividade térmica provoca uma diminuição de somente 9% na resistência ao fogo.

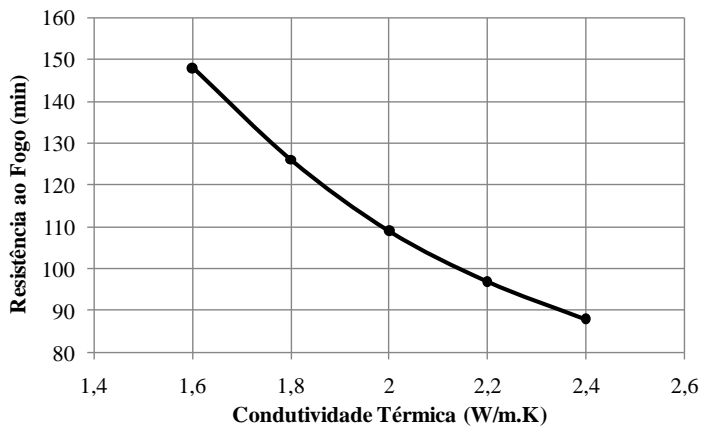


Figura 48 - Resistência ao fogo pelo isolamento térmico em função da condutividade térmica.

Calor específico

A Figura 49 mostra a influência da variação do calor específico na temperatura da face não exposta da parede, adotando-se valores de calor específico de 10 e 20% superiores e inferiores a 700 J/kg.K, mantendo a condutividade térmica constante em 2 W/m.K e a massa específica em 1750 kg/m³.

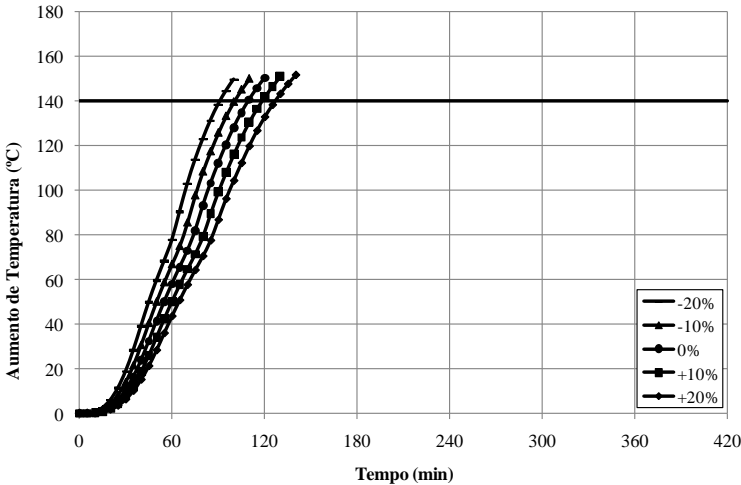


Figura 49 - Evolução de temperatura para diferentes valores de calor específico.

A Figura 50 mostra que um aumento no calor específico proporciona um aumento linear na resistência ao fogo da parede, considerando apenas o isolamento térmico. Constatou-se que a variação de 10% no calor específico causa uma variação de cerca de 9% no tempo de resistência ao fogo.

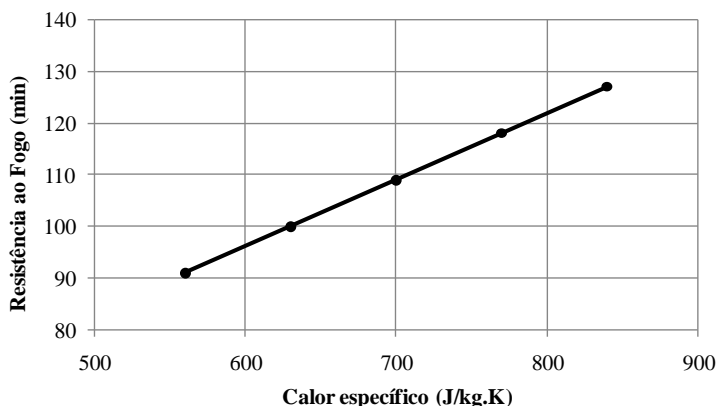


Figura 50 - Resistência ao fogo pelo isolamento térmico em função do calor específico.

Massa específica

Na Figura 51 está mostrada a influência na temperatura da face não exposta da variação da massa específica do material, onde foram adotados valores de 10 e 20% superiores e inferiores ao valor de 1750 kg/m^3 , mantendo a condutividade térmica fixa em 2 W/m.K e o calor específico em 700 J/kg.K .

Na Figura 52, pode-se verificar um aumento linear na resistência ao fogo da parede com o aumento da massa específica. Assim como para o calor específico, verificou-se que um aumento de 10% na massa específica causa um aumento de cerca de 9% no tempo de resistência ao fogo, considerando-se apenas o isolamento térmico.

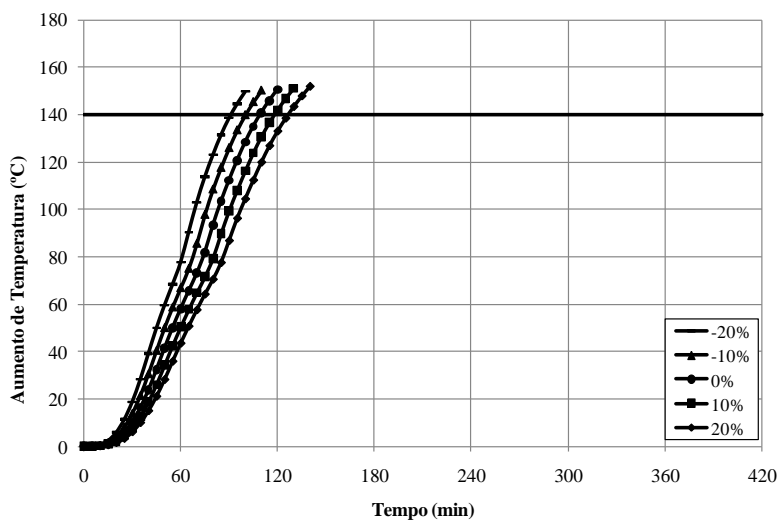


Figura 51 - Evolução de temperatura para diferentes valores de massa específica.

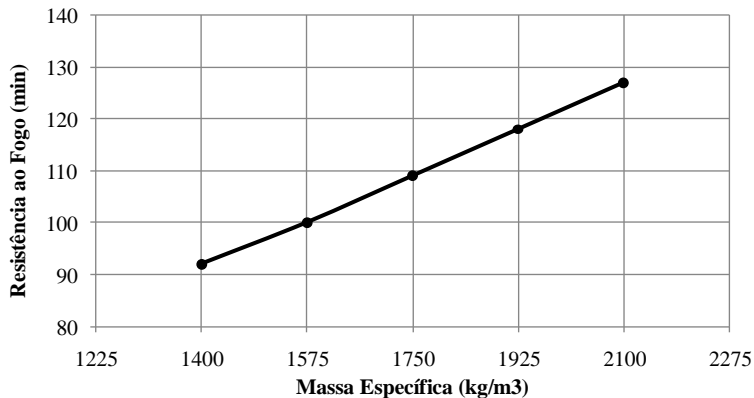


Figura 52 - Resistência ao fogo pelo isolamento térmico em função da massa específica.

4.2.5 Propriedades termofísicas utilizadas na modelagem

A calibração do modelo numérico iniciou pela escolha das propriedades termofísicas da cerâmica, procurando ajustar os resultados

numéricos com os resultados experimentais obtidos para a parede sem revestimento e sem preenchimento. A massa específica utilizada foi fornecida pelo fabricante, sendo mantida constante no tempo. Em seguida, foi ajustada a condutividade térmica, a qual possui uma influência na transmissão de calor maior que o calor específico, conforme verificado no estudo paramétrico. Por fim, ajustou-se o calor específico da cerâmica. As propriedades termofísicas da cerâmica usadas na modelagem das paredes sem preenchimento nos vazados estão mostradas na Tabela 6. Deve-se ressaltar que, para a cerâmica, a condutividade térmica utilizada é a condutividade térmica efetiva, que compensa o desprezo da transmissão de calor por radiação e convecção no interior dos vazados.

Tabela 6 – Propriedades termofísicas da cerâmica e da argamassa para as paredes sem preenchimento dos vazados.

T	Cerâmica			Argamassa		
	Massa espec.	Condut. térmica	Calor espec.	Massa espec.	Condut. térmica	Calor espec.
°C	kg/m ³	W/m.K	J/kg.K	kg/m ³	W/m.K	J/kg.K
0	1750	2,0	700	2100	1,5	800
20	1750	2,0	700	2100	1,5	800
50	1750	2,0	700	2100	8,0	800
70	1750	2,5	700	2100	1,0	800
85	1750	3,0	700	2100	1,0	800
99	1750	2,0	1400	2100	1,0	2400
101	1750	2,0	700	2100	1,0	1200
200	1750	2,0	700	2100	1,0	800
1500	1750	2,0	700	2100	1,0	800

Observa-se que, para melhorar o ajuste da curva numérica com a experimental, a condutividade térmica e o calor específico tiveram seus valores ligeiramente aumentados para as temperaturas próximas a 100 °C, conforme recomendado pela norma europeia EN 1996-1-2 e por outras bibliografias, devido à evaporação da umidade presente nos poros da cerâmica, a qual auxilia a transferência de calor, aumentando a condutividade térmica, e consome calor para mudança de fase, elevando o calor específico, conforme abordado na Seção 2.2.2.

Em seguida, foi realizada calibração do modelo numérico para a parede com revestimento de argamassa nas faces, buscando ajustar as

curvas numéricas e experimentais. Para tal, teve-se que ajustar as propriedades termofísicas da argamassa, uma vez que as propriedades da cerâmica já haviam sido encontradas para a parede sem revestimento. Utilizou-se um valor constante de massa específica, conforme disponível na literatura. Realizou-se, então, o ajuste da condutividade térmica, e, em seguida, do calor específico, conforme mostrado na Tabela 6.

Assim como para a cerâmica, com base na norma europeia EN 1996-1-2 e por outras bibliografias, para melhorar o ajuste das curvas, também foi adotado um aumento na condutividade térmica e no calor específico em temperaturas próximas a 100 °C, causado pela evaporação da umidade presente nos materiais.

A calibração dos modelos numéricos para as paredes com preenchimento nos vazados principais com areia iniciou pelo ajuste dos valores das propriedades da cerâmica e da argamassa encontrados para as paredes sem preenchimento. Isto porque a condutividade térmica efetiva, que compensa o desprezo da convecção e radiação nos vazados pelo aumento da condutividade térmica real, deve ser menor, pois os vazados encontram-se preenchidos, não havendo mais transmissão por convecção e radiação. A Tabela 7 apresenta a variação em função da temperatura das propriedades termofísicas da cerâmica e da argamassa, utilizadas na modelagem numérica das paredes com preenchimento dos vazados com areia.

Tabela 7 – Propriedades termofísicas da cerâmica e da argamassa para as paredes com preenchimento dos vazados.

T	Cerâmica			Argamassa		
	Massa espec.	Condut. térmica	Calor espec.	Massa espec.	Condut. térmica	Calor espec.
°C	kg/m ³	W/m.K	J/kg.K	kg/m ³	W/m.K	J/kg.K
0	1750	1,8	700	2100	1,5	800
20	1750	1,8	700	2100	1,5	800
50	1750	1,8	700	2100	8,0	800
70	1750	2,4	700	2100	1,0	800
85	1750	3,0	700	2100	1,0	800
99	1750	1,8	2100	2100	1,0	4000
101	1750	1,8	700	2100	1,0	2400
200	1750	1,8	700	2100	1,0	800
1500	1750	1,8	700	2100	1,0	800

Após o ajuste das propriedades termofísicas da cerâmica e da argamassa, a calibração do modelo para as paredes com preenchimento nos vazados prosseguiu com a determinação das propriedades termofísicas da areia, procurando, novamente, o melhor ajuste possível entre as curvas numéricas e experimentais, inclusive buscando reproduzir nas curvas os patamares em que as temperaturas permaneceram praticamente constantes, devido à evaporação da umidade.

Ainda que não tenha sido efetuado o controle da umidade da areia no instante do ensaio, como a areia é um material muito higroscópico, o melhor ajuste foi encontrado com um aumento no calor específico de 22 vezes para temperaturas ao redor de 100 °C, devido à consideração do calor latente de evaporação da umidade presente na areia. Além disso, a condutividade térmica até 100 °C também teve um significativo aumento, uma vez que haveria maior transferência de calor pela difusão do vapor evaporado do material. Após 100 °C, considerou-se que toda a umidade foi evaporada, utilizando o valor de condutividade térmica encontrado na literatura para areia seca. Os valores das propriedades termofísicas da areia utilizados na modelagem das paredes com preenchimento dos vazados estão mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades termofísicas da areia.

T	Areia		
	Massa específica	Condut. Térmica	Calor específico
°C	kg/m³	W/m.K	J/kg.K
0	1500	2,0	750
20	1500	2,0	750
50	1500	10,0	750
70	1500	80,0	750
85	1500	30,0	750
99	1500	0,30	17250
101	1500	0,30	1650
200	1500	0,30	1650
1500	1500	0,30	1650

Para a consideração da convecção do ambiente aquecido para a face exposta, foi adotado o valor do coeficiente h de 25 W/m².K, conforme recomendação existente no Eurocódigo EN 1991-1-2 para a

curva-padrão de incêndio em materiais celulósicos e para fogo exterior. A mesma norma recomendaria h de $50 \text{ W/m}^2\text{.K}$ para incêndios com hidrocarbonetos. Estes valores são valores conservadores, uma vez que, para convecção forçada em cavidades, os valores encontrados não ultrapassaram $5 \text{ W/m}^2\text{.K}$ (INCROPERA; DEWITT, 1992).

Já para a transferência de calor por convecção da face não exposta ao fogo para a temperatura ambiente, de natureza livre, o valor do coeficiente h adotado foi de $4 \text{ W/m}^2\text{.K}$, conforme recomendado pelo Eurocódigo EN 1991-1-2 para a convecção livre na face não exposta ao fogo.

Para a transferência de calor por radiação, na modelagem de todas as paredes, o valor de emissividade do material utilizado foi de 0,95, em ambas as faces, conforme indicado por Lamberts *et al* (2007).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos pelos métodos de cálculo do Brick Industry Association e dos elementos finitos, conforme as considerações realizadas nas seções 4.1 e 4.2, para as mesmas 4 configurações de paredes ensaiadas experimentalmente.

4.3.1 Método do Brick Industry Association

Inicialmente, a resistência ao fogo foi calculada a partir do método analítico de cálculo do Brick Industry Association, que leva em consideração apenas o critério do isolamento térmico. Os cálculos da espessura equivalente e da resistência ao fogo para as 4 configurações de paredes estão demonstrados no Apêndice E.

Para a parede sem revestimento e sem preenchimento, foi inicialmente determinada a espessura equivalente da parede, a partir da espessura nominal, de 140 mm, e do percentual de sólidos, de 48%, resultando em espessura equivalente de 67 mm. Foi então realizada uma interpolação linear entre os valores listados na Tabela 5, obtendo o tempo de resistência ao fogo de 79 minutos, valor 25,5% inferior ao valor experimental.

A parede com revestimento de argamassa em ambas as faces apresentou espessura equivalente de 93 mm, determinada somando-se a

espessura equivalente dos blocos cerâmicos, de 67 mm, com a espessura da argamassa no lado exposto ao fogo, de 15 mm, e com a espessura da argamassa no lado não exposto ao fogo, multiplicada pelo fator de correção de 0,75. Com a utilização da Tabela 5, através de interpolação linear, foi obtido o valor de resistência ao fogo de 138 minutos, valor que é 29,6% inferior ao experimental.

Para a parede com preenchimento de areia nos vazados principais, os vazados preenchidos foram considerados como material sólido do bloco, conforme determina o Brick Industry Association (2008). Deste modo, a espessura equivalente da parede foi calculada a partir da soma da porcentagem de material sólido do bloco com a porcentagem dos vazados preenchidos, multiplicando este resultado pela espessura real do bloco, sendo obtida a espessura equivalente de 116 mm. Utilizando a espessura equivalente, foi determinada a resistência ao fogo de 203 minutos, por meio de interpolação linear dos dados da Tabela 5, valor que é 16,5% inferior ao valor obtido experimentalmente, que foi de 243 minutos.

Por fim, a parede com preenchimento e com revestimento teve sua resistência ao fogo calculada em 290 minutos, valor 28,4% menor que o obtido experimentalmente. Este resultado foi obtido por meio da extrapolação dos dados da Tabela 5, a partir da espessura equivalente de 142 mm, calculada pela soma da espessura da parede com vazados preenchidos com a espessura das camadas de revestimento.

Na Tabela 9, os resultados obtidos por meio do método analítico do Brick Industry Association estão comparados com os resultados experimentais obtidos nos ensaios de resistência ao fogo.

Tabela 9 – Comparação entre os resultados experimentais e analíticos.

Parede	Ensaio (min)	BIA (min)	Diferença (%)
Parede sem revest. e sem preench.	106	79	-25,5%
Parede com revest. e sem preench.	196	138	-29,6%
Parede sem revest. e com preench.	243	203	-16,5%
Parede com revest. e com preench.	405	290	-28,4%

O método do Brick Industry Association apresentou uma variação de cerca de 25% entre os resultados experimentais e calculados, sendo que os valores encontrados estavam na faixa entre 16% e 29%.

A diferença encontrada entre os resultados pode ser explicada pelo fato de que a Tabela 5, utilizada para o cálculo da resistência ao fogo, foi estabelecida a partir de resultados de diversos ensaios realizados pelo BIA, em paredes de alvenaria que possuíam características próprias, tais como a matéria-prima, as dimensões dos blocos, e a geometria e a distribuição dos vazados no interior dos blocos. Deste modo, como as paredes de alvenaria utilizadas neste estudo possuem características ligeiramente diferentes das paredes utilizadas pelo BIA, as paredes podem apresentar diferentes comportamentos ao fogo, embora com a mesma espessura equivalente (ALLEN; HARMATHY, 1972).

A variação entre os resultados experimentais e calculados pode ser minimizada com a montagem de uma tabela para cálculo da resistência ao fogo, a partir de resultados de ensaios de resistência ao fogo realizados com as paredes e os blocos utilizados no Brasil.

Embora consista em um método rápido e simples, a diferença de 25% entre os valores de resistência ao fogo calculados e experimentais faz com que o método de cálculo proposto pelo National Bureau of Standards e simplificado pelo Brick Industry Association (2008) não seja adequado para a determinação precisa da resistência ao fogo das paredes com blocos cerâmicos, uma vez que se estaria desprezando uma parcela da real resistência ao fogo das paredes. No entanto, o método do BIA pode ser uma boa alternativa para situações em que se deseja estimar, de forma rápida, a resistência ao fogo de uma parede, mesmo desprezando uma parcela da real resistência ao fogo.

4.3.2 Método dos elementos finitos

A modelagem da transferência de calor através do bloco por meio do método de elementos finitos dos modelos calibrados forneceu curvas do aumento de temperatura da face não exposta ao fogo das paredes, bem como valores de resistência ao fogo pelo critério de isolamento térmico. O comportamento das curvas de aumento da temperatura e os resultados de resistência ao fogo puderam ser comparados com os resultados obtidos experimentalmente.

A Figura 53 ilustra a curva de temperatura da face não exposta do bloco representando a parede sem revestimento e sem preenchimento, obtida pelo método de elementos finitos (MEF). Ela apresenta um bom ajuste com a curva experimental, sendo obtido o tempo de resistência ao fogo pelo critério de isolamento térmico calculado numericamente igual a 109 minutos, 2,8% maior ao obtido experimentalmente. O erro existente entre os dois resultados pode ser considerado pequeno, validando o modelo numérico calibrado para esta parede.

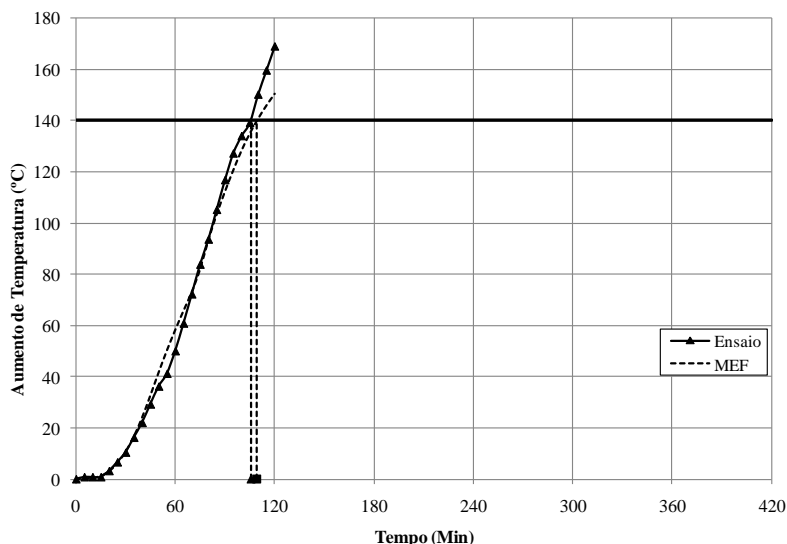


Figura 53 - Curvas do aumento de temperatura na face não exposta do bloco sem revestimento e sem preenchimento.

A Figura 54 mostra a curva de temperatura na face não exposta ao fogo, calculada pelo MEF, para o bloco representando a parede sem preenchimento, mas com revestimento de argamassa nas faces. Também foi encontrado um bom ajuste da curva numérica com a curva experimental, conforme se observa na mesma figura. O tempo de resistência ao fogo pelo isolamento térmico obtido através do MEF foi de 204 minutos, 4,1% maior ao tempo obtido em ensaios, representando um erro ainda pequeno, que possibilita validar o modelo numérico calibrado.

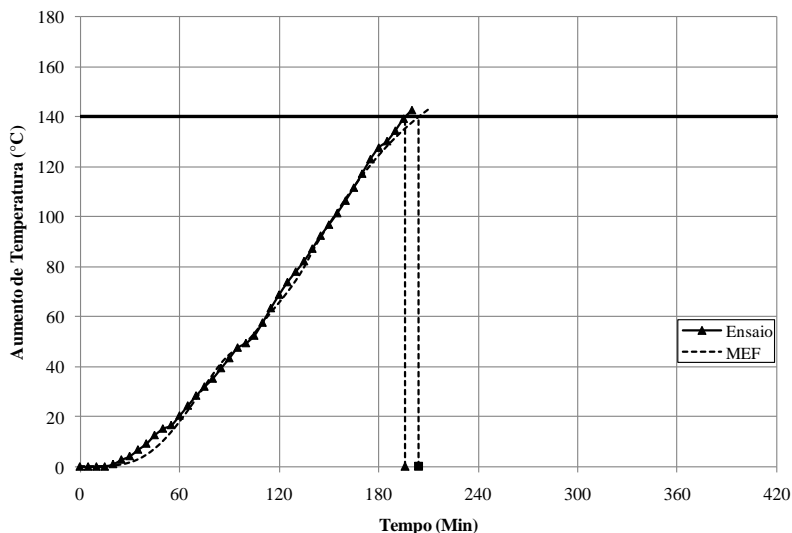


Figura 54 - Curvas do aumento de temperatura na face não exposta do bloco com revestimento e sem preenchimento.

A Figura 55 mostra a evolução da temperatura na face do bloco não exposta ao calor através do MEF para o bloco representando a parede com seus vazados principais preenchidos com areia média e sem revestimento nas faces. A curva obtida através do MEF também apresentou um bom ajuste com a curva experimental. Conseguiu-se simular o patamar em que a temperatura permaneceu estagnada, devido à evaporação da umidade existente no interior da parede, através do aumento no calor específico ao redor de 100 °C devido à consideração do calor latente de evaporação. O resultado obtido de resistência ao fogo pelo critério de isolamento térmico foi de 254 minutos, sendo 4,5% superior ao valor experimental, de 243 minutos, mostrando que a calibração do modelo numérico foi adequada.

Por fim, a Figura 56 ilustra a curva de evolução da temperatura média da face não exposta do bloco representando a parede com preenchimento dos vazados com areia média e também com revestimento de argamassa em ambas as faces, calculada através do MEF. Observa-se que também foi conseguido um bom ajuste da curva de temperatura obtida numericamente com a curva experimental, embora com diferenças um pouco maiores do que as observadas para as paredes anteriores. Obteve-se uma resistência ao fogo pelo isolamento

térmico de 379 minutos, valor que é 6,4% inferior ao valor obtido no ensaio (405 minutos), também validando o modelo calibrado adotado.

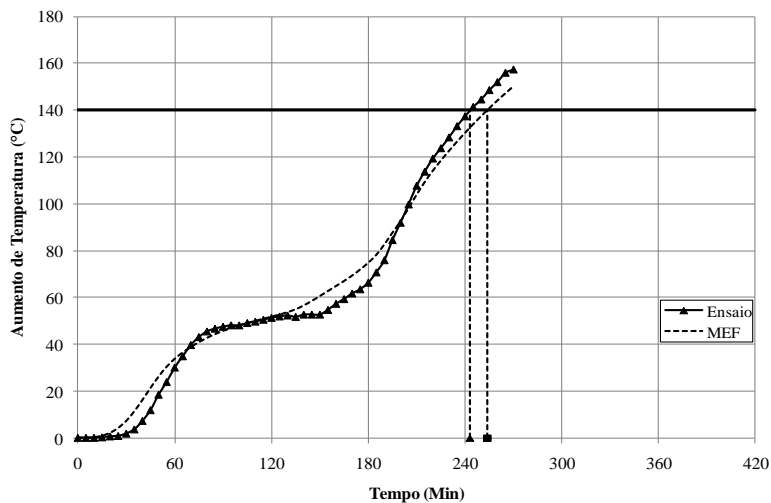


Figura 55 - Curvas do aumento de temperatura na face não exposta do bloco sem revestimento e com preenchimento.

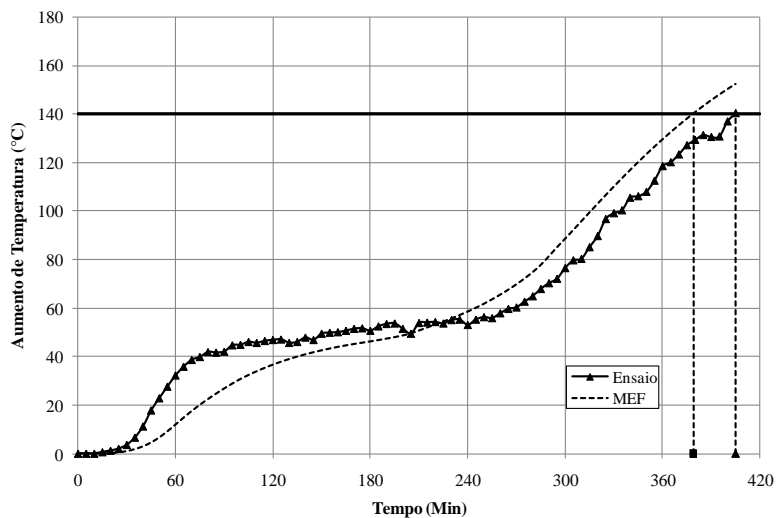


Figura 56 - Curvas do aumento de temperatura na face não exposta do bloco com revestimento e com preenchimento.

Os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos nos modelos calibrados foram comparados com os resultados dos ensaios de determinação da resistência ao fogo, sendo encontrados resultados muito similares, com um erro máximo de 6,4%, conforme resume a Tabela 10.

Tabela 10 – Comparação dos resultados experimentais e numéricos.

Parede	Ensaios (min)	MEF (min)	Diferença (%)
Parede sem revest. e sem preench.	106	109	2,8%
Parede com revest. e sem preench.	196	204	4,1%
Parede sem revest. e com preench.	243	254	4,5%
Parede com revest. e com preench.	405	379	-6,4%

Em virtude do pequeno erro encontrado e também do bom ajuste entre as curvas de aumento de temperatura na face não exposta ao fogo experimentais e numéricas, mostrou-se que a utilização do método de elementos finitos constitui uma boa alternativa para a estimativa da resistência ao fogo pelo critério de isolamento térmico das paredes de alvenaria.

A utilização do MEF apresentou as vantagens de ser mais simples, mais rápido e de menor custo do que o ensaio. No entanto, o MEF demandou tempo e esforço consideráveis para a elaboração do modelo, uma vez que tiveram de ser fornecidos todos os dados referentes à geometria da parede, ao carregamento e aos modelos de transmissão de calor, e principalmente, porque foi necessário realizar a calibração do modelo, por meio do ajuste das propriedades térmicas dos materiais a partir das temperaturas obtidas experimentalmente.

Ressalta-se que não foi considerada a transmissão de calor por convecção e radiação no interior dos vazados dos blocos, sendo aumentada a condutividade térmica do bloco cerâmico, para corrigir tal deficiência do modelo. Para aprimorar o presente estudo, sugere-se a implementação de um modelo mais completo, que considere a transferência de calor por convecção e radiação no interior dos vazios do bloco cerâmico. O modelo também pode ser melhorado introduzindo a

transferência de calor por convecção e radiação das quatro paredes que constituem o forno utilizado no ensaio.

O emprego do MEF também pode ser aprimorado com a realização de ensaios para a caracterização e determinação das propriedades termofísicas de cada um dos materiais empregados na construção das paredes, uma vez que o estudo foi conduzido com base na escolha dentre os valores existentes na literatura, de modo a proporcionar a calibração dos modelos térmicos.

4.3.3 Análise comparativa do desempenho térmico das paredes

Análise no ponto central da face não exposta ao fogo

Tal como realizado no caso dos resultados experimentais na Seção 3.2.5, foi efetuada a comparação do desempenho térmico das paredes segundo os resultados obtidos através do MEF, conforme ilustra a Figura 57.

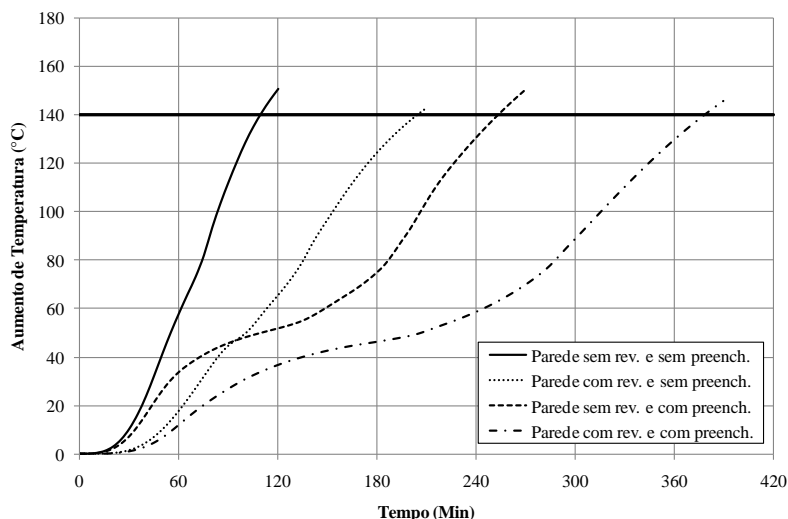


Figura 57 - Temperatura da face não exposta dos blocos obtida pelo MEF.

Pode ser verificada a menor inclinação das curvas de aumento de temperatura dos blocos representando as paredes com revestimento, em

relação às respectivas curvas das paredes sem revestimento, devido ao aumento no isolamento térmico da parede e, em decorrência, na sua resistência ao fogo.

Na análise das curvas obtidas para os blocos representando as paredes com preenchimento, em relação às paredes sem preenchimento, verificou-se que, além de apresentarem uma menor taxa de crescimento da temperatura, as curvas apresentam um patamar, na parte intermediária de seus ensaios, em que a temperatura permaneceu praticamente constante. Desse modo, o preenchimento do interior dos vazados dos blocos com areia significou em um aumento no isolamento térmico, implicando no aumento da resistência ao fogo das paredes.

Análise de temperaturas na linha média da seção transversal

Por meio do MEF, torna-se possível determinar a evolução das temperaturas em função do tempo em qualquer ponto da parede. A seguir, apresentam-se, para cada parede, as curvas de aumento da temperatura dos principais pontos ao longo da linha média da seção transversal dos blocos que representam estas paredes.

A Figura 58 ilustra a evolução da temperatura da parede sem revestimento e sem preenchimento para um ponto no centro da face exposta ao fogo, para um ponto no centro do bloco, e para um ponto no centro da face não exposta ao fogo. A curva da face exposta ao fogo acompanha a evolução da temperatura dos gases no interior do forno, uma vez que a face do bloco está em contato direto. A curva do centro do bloco apresenta um formato muito semelhante à curva da face exposta ao fogo, porém com valores bem inferiores.

Na Figura 59 encontram-se as curvas de temperatura \times tempo obtidas pelo MEF para 5 pontos diferentes da parede com revestimento: um ponto no centro da face da argamassa exposta ao fogo, um ponto no centro da superfície de contato entre a argamassa e o bloco, um ponto exatamente no centro do bloco, um ponto no centro da superfície de contato argamassa e bloco na face não exposta ao fogo, e um ponto no centro da face da argamassa não exposta ao fogo. Pode-se observar que estas 2 últimas levaram quase 60 minutos para apresentarem evolução das temperaturas.

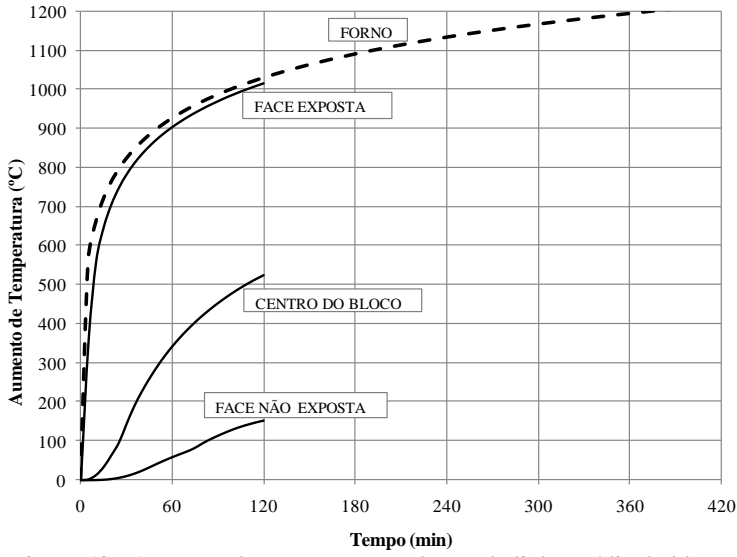


Figura 58 - Aumento de temperatura ao longo da linha média do bloco representando a parede sem revestimento e sem preenchimento.

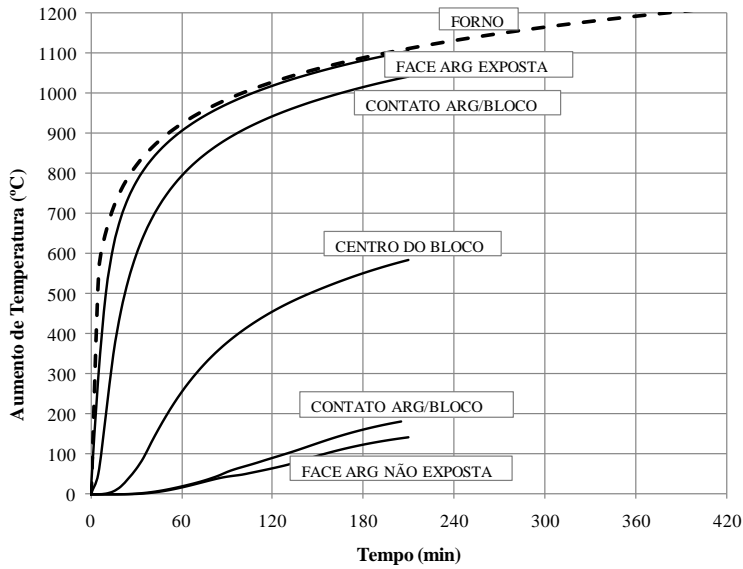


Figura 59 - Aumento de temperatura ao longo da linha média do bloco representando a parede com revestimento e sem preenchimento.

Na Figura 60 estão as curvas de aumento da temperatura da parede com preenchimento nos vazados para um ponto no centro da face exposta ao fogo, para um ponto no centro do bloco, e para um ponto no centro da face não exposta ao fogo. Pode-se verificar que o período em que a temperatura da face não exposta permaneceu aproximadamente constante foi observado também na curva do ponto central do bloco.

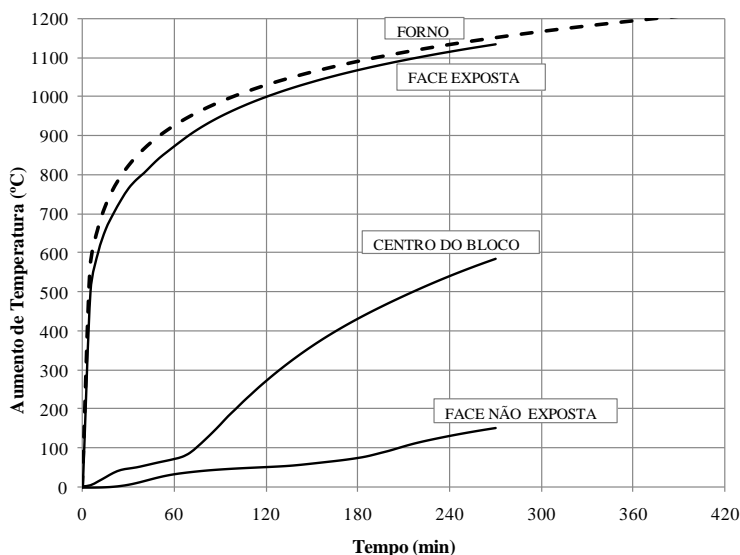


Figura 60 - Aumento de temperatura ao longo da linha média do bloco representando a parede sem revestimento e com preenchimento.

Por fim, a Figura 61 ilustra as curvas de temperatura \times tempo obtidas para 5 pontos diferentes do bloco representando a parede com revestimento e com preenchimento: um ponto no centro da face da argamassa exposta ao fogo, um ponto no centro da superfície de contato entre a argamassa e o bloco, um ponto exatamente no centro do bloco, um ponto no centro da superfície de contato argamassa e bloco na face não exposta ao fogo, e um ponto no centro da face da argamassa não exposta ao fogo. Também se observou o período de temperatura constante da curva da face não exposta ao fogo nas curvas dos pontos no interior do bloco.

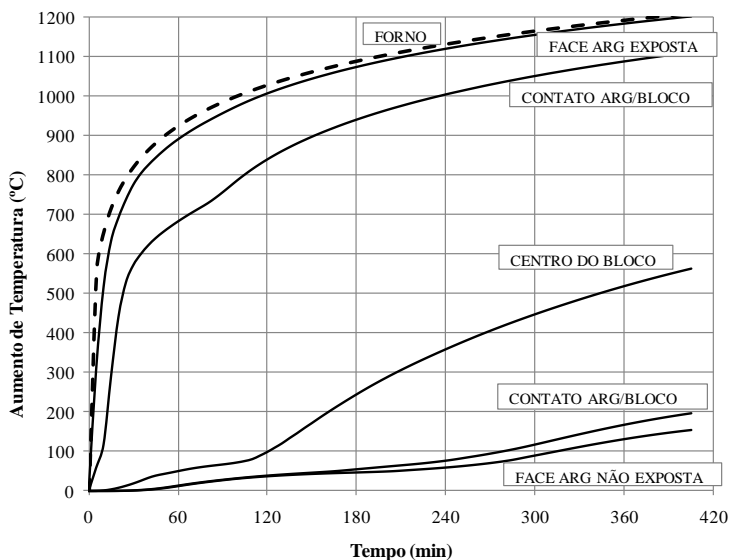


Figura 61 - Aumento de temperatura ao longo da linha média do bloco representando a parede com revestimento e com preenchimento.

Análise do campo de temperaturas na seção transversal

As Figuras 62 a 65 ilustram o campo de temperaturas obtido mediante o MEF para as 4 configurações de paredes estudadas, após 30, 60 e 90 minutos do início do ensaio e no instante final do ensaio. Em cada figura, pode-se verificar como ocorre a transmissão de calor da face exposta ao fogo para a face não exposta.

Ao comparar as Figuras 62 e 63, verifica-se que a aplicação de revestimentos nas faces da parede retarda a transmissão de calor entre as faces. Na comparação entre as Figuras 62 e 64, constata-se a eficiência do preenchimento dos vazados para o aumento no isolamento térmico, devido principalmente ao calor absorvido pelo material de enchimento.

Por fim, no cotejo entre as Figuras 62 e 65, pode-se verificar o ganho de isolamento térmico devido ao revestimento nas faces e ao preenchimento dos vazados. Na Figura 62 (c), verifica-se que a parede sem revestimento e sem preenchimento, aos 90 minutos, já possui um aquecimento considerável na face não exposta ao fogo, enquanto que na Figura 65 (c), no mesmo tempo de ensaio, a parede com revestimento e com preenchimento sequer teve seu aquecimento iniciado.

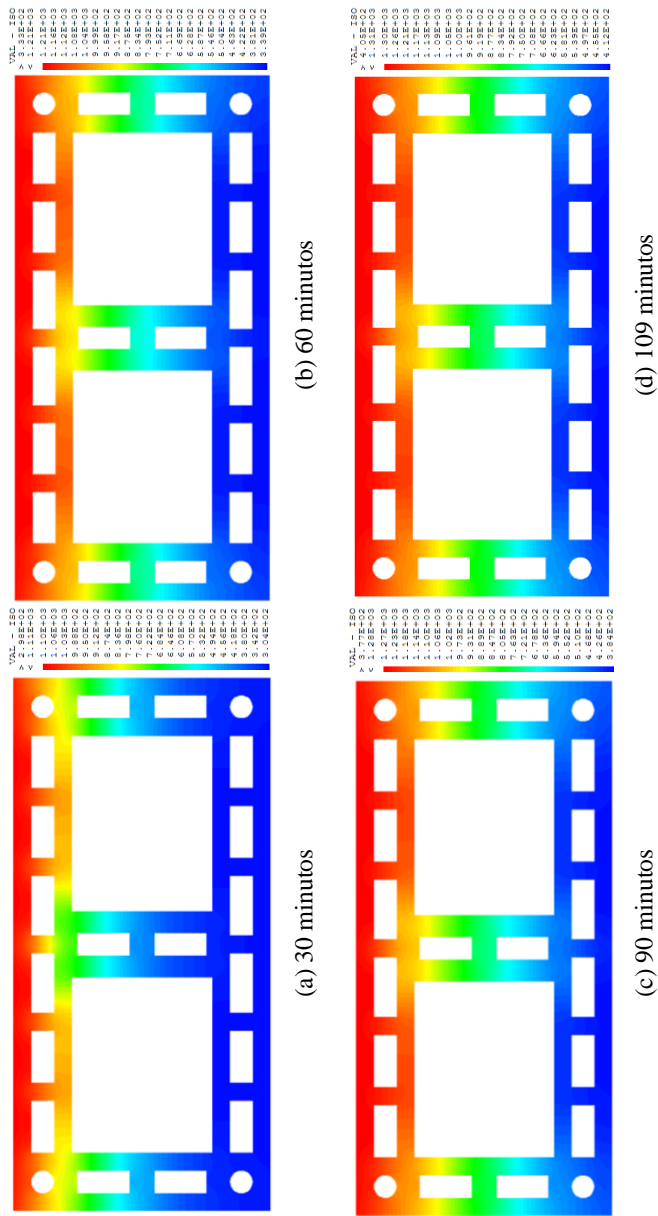


Figura 62 - Campo de temperaturas do bloco sem revestimento e sem preenchimento.

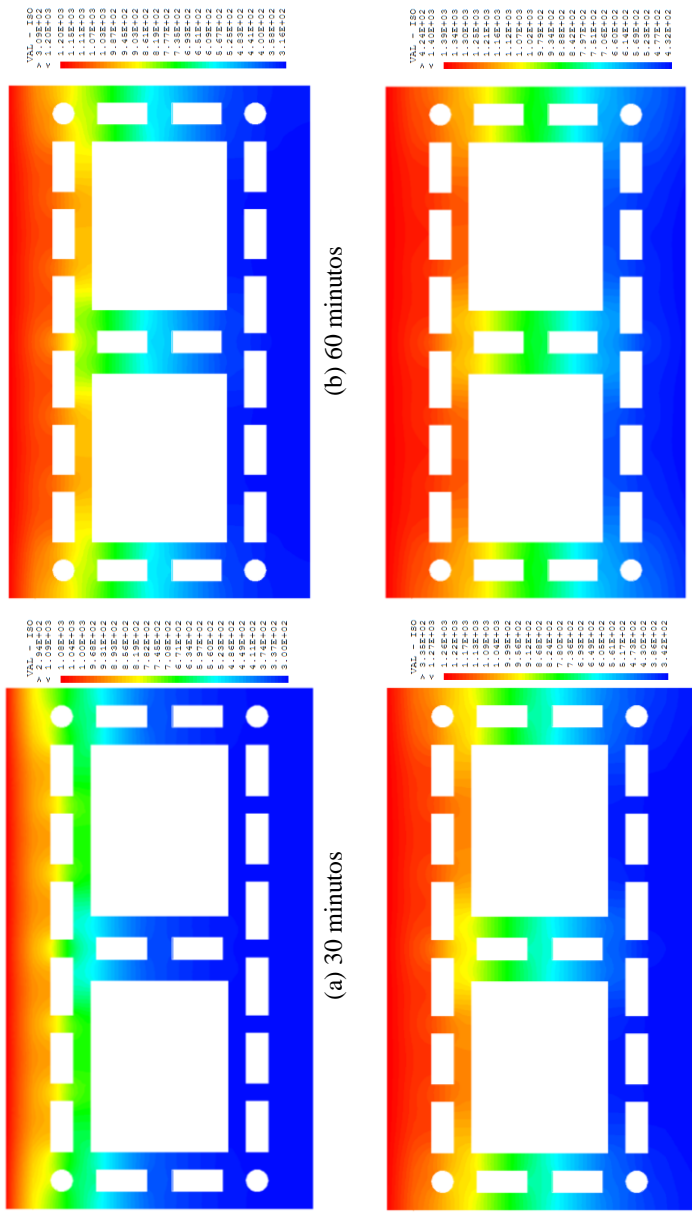


Figura 63 - Campo de temperaturas do bloco com revestimento e sem preenchimento.

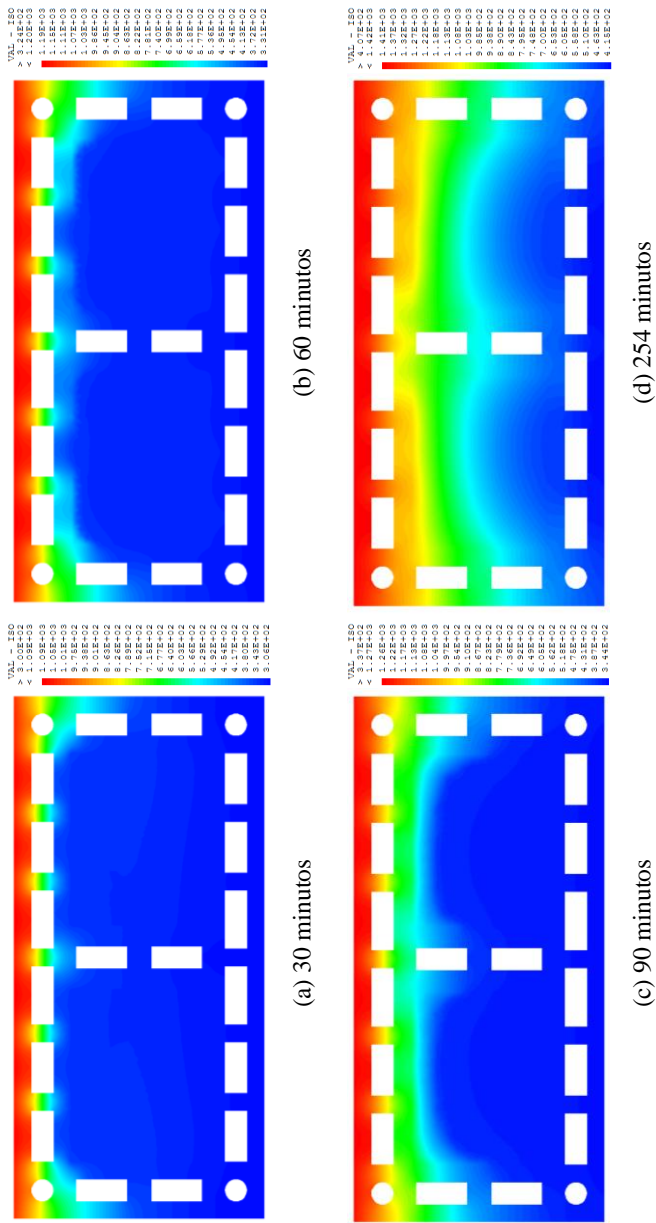


Figura 64 - Campo de temperaturas do bloco sem revestimento e com preenchimento.

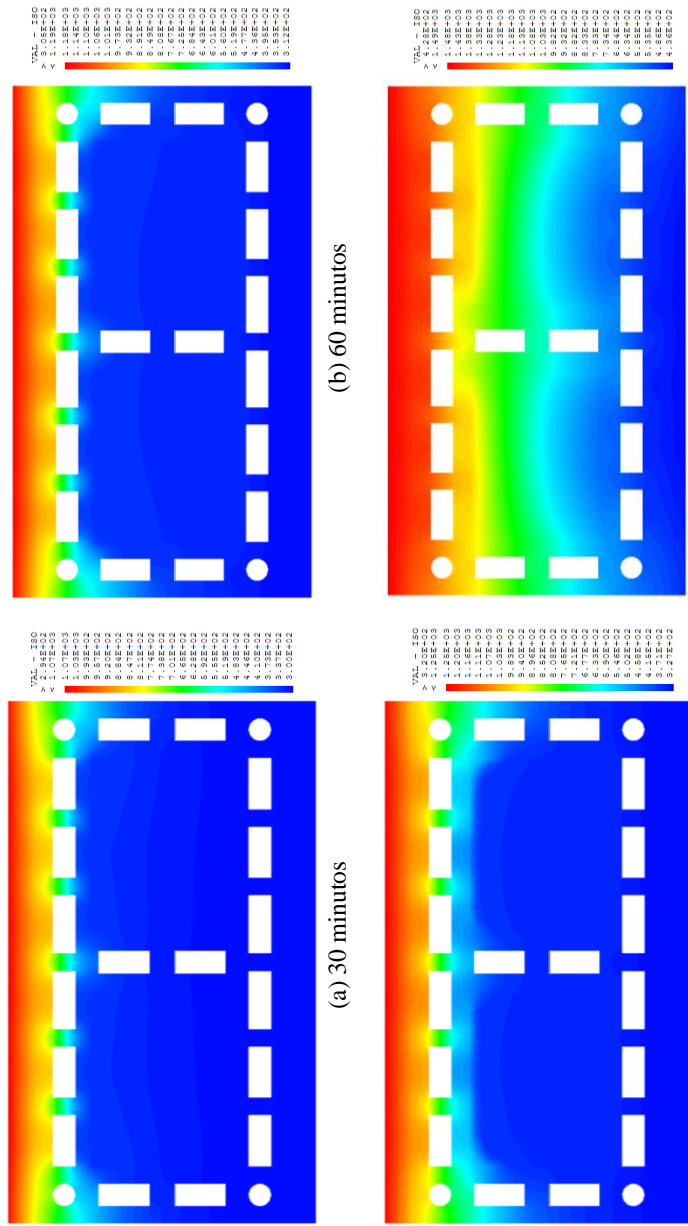


Figura 65 - Campo de temperaturas do bloco com revestimento e com preenchimento.

4.3.4 Análise paramétrica da camada de revestimento

A calibração do modelo do MEF permitiu a realização de uma análise paramétrica da resistência ao fogo, pelo critério de isolamento térmico, das paredes com revestimento de argamassa em ambas as faces, em função da espessura da camada de revestimento.

Foram utilizadas as mesmas propriedades da cerâmica e da argamassa encontradas no modelo calibrado, com espessuras de 0,5 cm, 1,0 cm, 1,5 cm, 2,0 cm e 2,5 cm. As curvas de aumento de temperatura na face não exposta ao fogo das paredes para cada uma das espessuras mostrada na Figura 66.

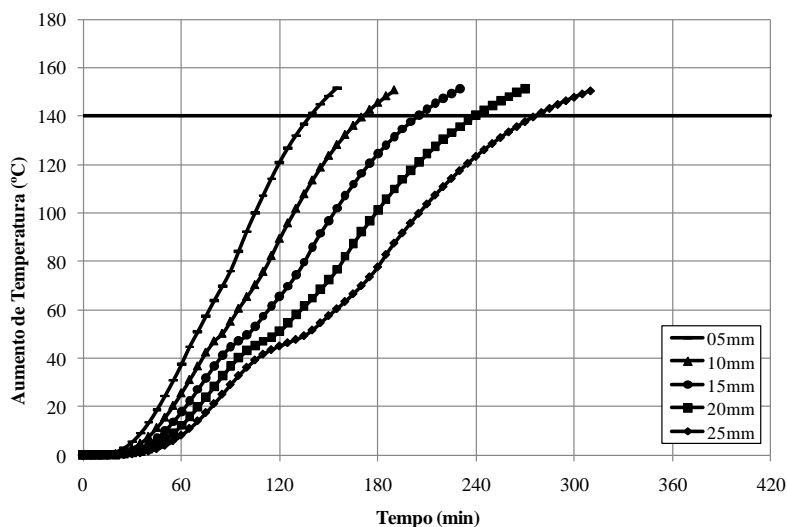


Figura 66 - Evolução de temperatura para diferentes espessuras da camada de revestimento.

Na Figura 67, que contém o valor de resistência ao fogo, considerando apenas o isolamento térmico, para cada espessura de revestimento, pode-se verificar um aumento aproximadamente linear na resistência ao fogo da parede em função da espessura da camada de revestimento, a uma taxa de cerca de 7 min/mm. Esta curva pode ser utilizada para se estimar a resistência ao fogo de paredes com o mesmo bloco cerâmico, mas com camadas de revestimento de argamassa de diferentes espessuras, sem que haja necessidade de efetuar um ensaio real. Entretanto, deve-se atentar que, para camadas de revestimento

muito espessas, a curva obtida não deve ser utilizada, pois pode ocorrer um aumento na fissuração e o descolamento da camada de revestimento.

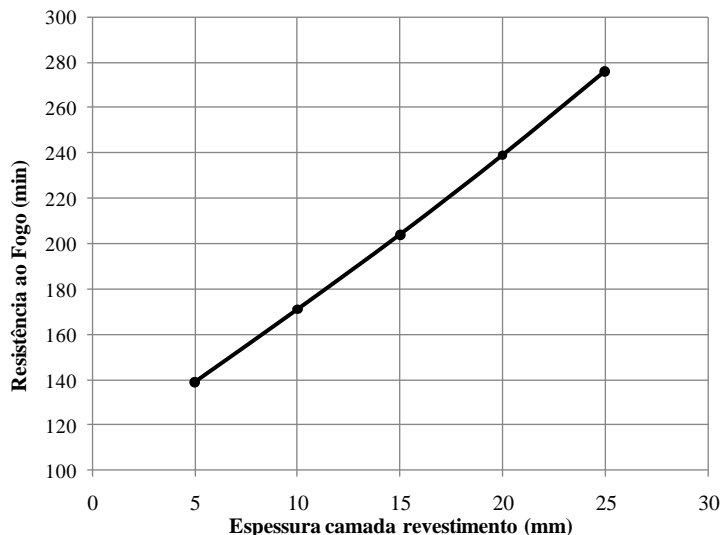


Figura 67 - Resistência ao fogo em função da espessura da camada de revestimento.

Através do MEF, pode-se ainda realizar simulações de cálculo da resistência ao fogo de paredes preenchidas em seus vazados com outros materiais de enchimento, que possuam propriedades térmicas isolantes, bastando determinar previamente os valores de condutividade térmica e calor específico do material.

4.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

O método de cálculo do Brick Industry Association, que determina a resistência ao fogo levando em consideração apenas o isolamento térmico, mostrou-se um método simples e rápido. No entanto, forneceu resultados de cerca de 25% menores que aqueles obtidos experimentalmente, resultando em uma avaliação conservadora da resistência ao fogo, porém simples e rápida de ser realizada. Em futuras pesquisas, sugere-se a adequação das tabelas utilizadas no

cálculo da resistência ao fogo através do método do BIA, através da realização de um maior número de ensaios com os blocos utilizados no Brasil e do tratamento estatístico dos dados obtidos.

Por sua vez, o método dos elementos finitos foi empregado para a resolução de um modelo numérico calibrado, conseguindo reproduzir a transferência de calor através de um bloco cerâmico representando uma parede de alvenaria submetida a incêndio. Este modelo numérico foi calibrado de modo que as curvas de temperatura da face não exposta ao calor apresentassem o melhor ajuste possível em relação às curvas experimentais, conseguido com o ajuste dos valores das propriedades dos materiais constituintes das paredes. Deste modo, os resultados de resistência ao fogo, pelo critério de isolamento térmico, apresentaram erros entre 2,8% e 6,4% em relação aos resultados experimentais. Isso permite concluir que os modelos calibrados resolvidos pelo método de elementos finitos são uma boa alternativa em substituição aos ensaios de resistência ao fogo, apresentando maior simplicidade e rapidez, com um custo muito mais reduzido, embora considere apenas o requisito de isolamento térmico.

A utilização do MEF também permitiu realizar uma análise paramétrica da resistência ao fogo, possibilitando a estimativa do comportamento ao fogo das paredes de alvenaria no caso de serem alteradas as características geométricas ou as propriedades dos materiais utilizados, sem a necessidade de realização de novos ensaios. O aumento na condutividade térmica provoca uma diminuição não linear no tempo de resistência ao fogo, enquanto que um aumento no calor específico e na massa específica causa um aumento linear na resistência ao fogo. Em relação às paredes com revestimento, verificou-se que o aumento na espessura da camada de revestimento provoca um aumento linear de cerca de 7 min/mm na resistência ao fogo da parede, pelo critério de isolamento térmico.

Como sugestão para futuras pesquisas, de modo a aperfeiçoar a modelagem das paredes por meio do MEF, podem ser realizados ensaios para a determinação das propriedades termofísicas dos materiais empregados, utilizando-se, dessa forma, os valores reais ao invés dos valores existentes da literatura. Também se sugere a utilização de modelos mais completos, que considerem a transmissão de calor por convecção e radiação no interior dos vazados dos blocos, bem como as trocas de calor entre as quatro paredes e os gases aquecidos do interior do forno.

5. CONCLUSÕES FINAIS

Neste trabalho foi avaliada a resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural construídas com blocos cerâmicos por meio de métodos experimentais e dos métodos de cálculo do Brick Industry Association e dos elementos finitos. Foram realizados ensaios em paredes em 4 diferentes configurações: sem revestimento e sem preenchimento; com revestimento nas faces interna e externa; com enchimento nos vazados; e com revestimento e com enchimento. Os ensaios foram conduzidos segundo as prescrições da NBR 5628, sem aplicação de carregamentos, fazendo com que as conclusões obtidas fiquem restritas ao requisito de isolamento térmico. As paredes estudadas foram construídas com dimensões de 2,70 m de largura e 2,60 m de altura, sendo empregados blocos cerâmicos de dimensões de 14 cm × 19 cm × 29 cm, com resistência mecânica à compressão nominal de 9 N/mm². Os resultados experimentais levaram às seguintes conclusões:

- a parede de blocos cerâmicos sem preenchimento nos vazados e sem revestimento nas faces apresentou resistência ao fogo de 106 minutos, considerando apenas o isolamento térmico, valor superior a resistência ao fogo de blocos de concreto, permitindo que esta parede seja utilizada em diversas situações onde sejam exigidas classes de resistência ao fogo mínima de 90 minutos;
- a resistência ao fogo obtida para a parede com revestimento de argamassa em ambas as faces foi de 196 minutos, representando um aumento superior a 80%, e, para a parede com os vazados dos blocos preenchidos com areia, a resistência ao fogo encontrada foi de 243 minutos, uma melhoria de pelo menos 100%. Comprovou-se que o revestimento das faces com argamassa e o preenchimento dos vazados com areia representam boas alternativas para a melhoria do desempenho ao fogo das paredes de alvenaria, embora as paredes com revestimento tenham apresentado um aumento da fissuração e das deformações das amostras;
- a parede com preenchimento dos vazados e com revestimento de argamassa apresentou uma resistência ao fogo pelo critério de isolamento térmico de 405 minutos, indicando que tais paredes podem ser utilizadas em situações onde um alto nível de resistência ao fogo seja exigido;

Em relação aos métodos de cálculo utilizados no estudo, as conclusões foram:

- o método de cálculo do Brick Industry Association mostrou-se extremamente rápido e simples, porém com resultados cerca de 25% inferiores aos obtidos nos ensaios, fazendo com que este método seja adequado apenas para uma estimativa rápida da resistência ao fogo de uma parede;
- o método de elementos finitos mostrou ser uma boa alternativa aos ensaios de resistência ao fogo, devido ao menor custo e à maior simplicidade e rapidez. O modelo numérico foi calibrado em função dos resultados experimentais, mediante o ajuste dos valores das propriedades termofísicas dos materiais, fazendo com que o modelo calibrado apresentasse erro máximo de apenas 6,4% em comparação aos resultados experimentais.

Para pesquisas futuras, uma vez que o presente estudo utilizou apenas uma amostra para cada configuração de parede, sugere-se que sejam feitas repetições dos ensaios, a fim de permitir uma conclusão definitiva sobre o assunto. Também se sugere a realização de ensaios variando características construtivas das paredes, de modo a avaliar a influência do tipo do bloco, de diferentes resistências e geometrias, de revestimentos com diferentes espessuras ou de outros materiais, e ainda de outros materiais, com propriedades isolantes, para o preenchimento dos vazados dos blocos.

Também se pode realizar ensaios de resistência ao fogo com a aplicação de carregamentos sobre as paredes e com emprego de instrumentação para controle das fissuras e deformações ocorridas, permitindo que os resultados levem em consideração os requisitos de estanqueidade e estabilidade estrutural.

Para o cálculo da resistência ao fogo pelo método do BIA, sugere-se que as tabelas sejam ajustadas, mediante a realização de um maior número de ensaios com os blocos utilizados no Brasil e o tratamento estatístico dos dados obtidos.

Por fim, a modelagem térmica das paredes através do MEF pode ser aperfeiçoada, introduzindo a convecção e a radiação no interior das cavidades e entre as paredes que constituem o forno. Também os materiais poderiam ser caracterizados quanto às suas propriedades termofísicas, permitindo a utilização dos valores reais dos materiais ao invés dos valores fornecidos da literatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL NAHHAS, F. *et al.* Resistance to fire of walls constituted by hollow blocks: Experiments and thermal modeling. **Applied Thermal Engineering**, v. 27, n. 1, p. 258-267, 2007.

AL-HADHRAMI, L. M.; AHMAD, A. Assessment of thermal performance of different types of masonry bricks used in Saudi Arabia. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, p. 1123-1130, 2009.

ALLEN, L. W.; HARMATHY, T. Z. Fire endurance of selected concrete masonry walls. **American Concrete Institute Journal**, v. 69, n. 9, p. 562-568, 1972.

ALMEIDA, C. A. de. Construções em Alvenaria Estrutural de Blocos Cerâmicos: Um Breve Panorama do Empreendimento: Aspectos do Mercado, Importância do Planejamento e Ações para Prevenir Falhas Frequentes. In: SANCHEZ FILHO, E. S. **Alvenaria Estrutural: Novas Tendências Técnicas e de Mercado**. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda, 2002. p. 83-89.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **Standard methods for fire tests of building construction and materials – ASTM E119**. Philadelphia, 2008.

ARANTES, C. A.; CAVALHEIRO, O. P. Influência do graute na alvenaria estrutural de blocos vazados cerâmicos. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10, 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANTAC. 2004. 9 p.

AREASEG. **Fogo e incêndio**. Disponível em <<http://areaseg.com/fogo>>. Acesso em: 19 setembro 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Componentes cerâmicos – Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos – NBR 15270-2**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **Componentes construtivos estruturais – determinação da resistência ao fogo – NBR 5628.** Rio de Janeiro, 2001.

_____. **Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento – NBR 14432.** Rio de Janeiro, 2001.

_____. **Paredes divisórias sem função estrutural – Determinação da resistência ao fogo – NBR 10636.** Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DA INDÚSTRIA DE CERÂMICA – APICER . **Manual de Alvenaria de Tijolo.** Coimbra: APICER, 2000. 208 p.

BATHE, K-J. **Finite Element Procedures.** Nova Jersey: Prentice-Hall, 1996. 1037 p.

BEALL, C. Calculating masonry's fire resistance. **Masonry Construction Magazine**, Agosto 1994. 4 p. Disponível em: <<http://www.masonryconstruction.com/>>. Acesso em: 04 setembro 2008.

BONTESE, K. V. **Segurança contra incêndio em edifício habitacional de baixo custo estruturado em aço.** 2007. 253 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Assistência à Saúde. **Série Saúde & Tecnologia – Textos de Apoio à Programação Física dos Estabelecimentos Assistenciais de Saúde – Condições de Segurança Contra Incêndio** – Brasília, 1995. 107 p.

BRICK INDUSTRY ASSOCIATION – BIA. **Technical Note 16: Fire resistance of brick masonry.** Reston, VA, 2008. 16 p.

BRICK INDUSTRY ASSOCIATION – BIA. **Technical Note 16B: Calculated Fire resistance.** Reston, VA, 1991. 13 p.

BUCHANAN, A. H. **Structural design for fire safety.** Canterbury: John Wiley & Sons, 2002. 421 p.

CARVALHO, J. M. de. **Desempenho estrutural de prismas de blocos cerâmicos com diferentes formas e dimensões**. 2003. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CARVALHO, J. D. N. **A contribuição de enrijecedores laterais para o efeito arco na alvenaria estrutural**. Florianópolis, 2007. 282 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CHICHIERCHIO, L. C. Conforto ambiental: Desempenho térmico e acústico e proteção contra o fogo. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA - ABCI. **Manual técnico de alvenaria**. São Paulo: ABCI, 1990. p. 119-141.

CHUNG, T. J. **Finite Element Analysis in Fluid Dynamics**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1978. 378p.

COMITE EUROPEEN DE NORMALISATION. **Eurocode 1 : Actions sur les structures -Partie 1-2 : Actions générales - Actions sur les structures exposées au feu - EN 1991-1-2**. Bruxelas, 2002.

DE VEKEY, R. C. The fire performance of insulated cavity walls. In: 5th INTERNATIONAL MASONRY CONFERENCE, 1998, Londres. **Proceedings...** Londres, 1998. 390p. p. 229-234.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 1-2: General rules – Structural fire design - EN 1996-1-2**. Bruxelas, 2005.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **A first course in finite elements**. West Sussex: Wiley, 2007. 336 p.

HAHN, C. Experience of fore behavior of masonry and the proposed CEN standard for assessment. In: 3rd INTERNATIONAL MASONRY CONFERENCE, 1994, Londres. **Proceedings...** Londres, 1994. 318p. p. 285-289.

HARMATHY, T. Z. **Fundamentals of designing buildings for fire safety**. Ottawa, 1984, 19p. Disponível em: <[http://www. nrc-nrc.gc.ca/](http://www.nrc-nrc.gc.ca/)>. Acesso em: 28 novembro 2009.

HARMATHY, T. Z.; SULTAN, M. A. Correlation between the severities of the ASTM E119 and ISO 834 fire exposures. **Fire Safety Journal**, v. 13, n. 2-3, p. 163-168, 1988.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 3ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 1992. 455 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements – ISO 834-1**. Genebra, 1999.

KAEFER, E. C.; SILVA, V. P. Análise paramétrica de um incêndio conforme o novo Eurocode 1. In: IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 24, 2003, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto. 2003. 14 p.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW, 1997. 192 p.

LAMBERTS, R. *et al.* **Desempenho Térmico de Edificações**. Notas de Aula. 5ª ed. Florianópolis, novembro 2007. 182 p.

MARCATI, J.; COELHO FILHO, H. S.; BERQUÓ FILHO, J. E. Compartimentação e afastamento entre edificações. In: SEITO, A. I. *et al* (Coord.). **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 169-179.

MENDES, N. *et al.* Moisture content influence on thermal conductivity of porous building materials. In: 7th INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 2001, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro, 2001. p. 957-963.

MENDES, R. J. K. **Resistência à compressão de alvenarias de blocos cerâmicos estruturais**. 1998. 185 p. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MEYER, U. Extended Application Rules for the fire performance of masonry walls. In: 7th INTERNATIONAL MASONRY CONFERENCE, 2006, Londres. **Proceedings...** Londres, 2006. 4p. Disponível em: < <http://www.masonry.org.uk/> >. Acesso em: 06 setembro 2008.

MINGZHI, A. *et al.* Influence of moisture content on measurement accuracy of porous media thermal conductivity. **Heat Transfer – Asian Research**, v. 38, n. 8, p. 492-500, 2009.

MITIDIERI, M. L. O comportamento dos materiais e componentes construtivos diante do fogo - reação ao fogo. In: SEITO, A. I. *et al.* (Coord.). **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 55-75.

NADJAI, A. *et al.* Compartment masonry walls in fire situations. **Fire Technology**, v. 42, n. 3, p. 211-231, 2006.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS – NBS. **Fire resistance classifications of building constructions**. Report BMS92. Washington: US Government Printing Office. 1942. 70p.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION - NFPA. **All about fire**. Disponível em: <<http://www.nfpa.org>>. Acesso em: 19 setembro 2009.

NGUYEN, T. *et al.* The behaviour of masonry walls subjected to fire: Modelling and parametrical studies in the case of hollow burnt-clay bricks. **Fire Safety Journal**, v. 44, n. 4, p. 629-641, 2009.

NORTHWEST CONCRETE MASONRY ASSOCIATION – NWCMA. **Concrete Masonry Fire Resistance**. TEK Note. Lynwood, WA, 2005. 4 p.

O’CONNOR, D. J.; SILCOCK, G. W. H.; MORRIS, B. An investigation of scale modeling of the thermo-structural performance of compartment walls in standard fire tests. In: 4th INTERNATIONAL

MASONRY CONFERENCE, 1995, Londres. **Proceedings...** Londres, 1995. 539p. p. 402-406.

OLIVEIRA, L. A. P. de. **Estimativa da resistência ao fogo de paredes de alvenaria pelo critério de isolamento térmico**. Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, n° 05, dezembro 1998. 10 p. Disponível em: < <http://bt.fatecsp.br/>>. Acesso em: 11 setembro 2008.

ONO, R. Parâmetros para garantia da qualidade do projeto de segurança contra incêndio em edifícios altos. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 97-113, 2007.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia – Microestrutura e propriedades**. Curitiba: Hemus, 1997. 352 p.

PANARESE, W.; KOSMATKA, S. H.; RANDALL JR, F. A. **Concrete Masonry Handbook**. 5ª Ed. Skokie, IL: Portland Cement Association, 1991. 264 p.

PIERIN, I. ; ROVERE, H. L. ; MORAES, P. D. Análise térmica de paredes em blocos cerâmicos estruturais por meio do método dos elementos finitos. In: CONGRESSO IBERO LATINO AMERICANO DE METODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA, 30, 2009, Búzios. **Anais...** Rio de Janeiro: EDUF RJ, 2009. v.1. p. 1-15.

PINTO, C. S. C. *et al.* Measurement of thermophysical properties of ceramics by the flash method. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 48, p. 31-39, 2006.

RAZENTE, J. A. **Aplicação de recursos computacionais em projetos de edifícios em alvenaria**. São Carlos, 2004. 188 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

ROMAN, H. R. Características físicas e mecânicas que devem apresentar os tijolos e blocos cerâmicos para alvenaria de vedação e estrutural. In: III SIMPÓSIO DE DESEMPENHO DE MATERIAIS E COMPONENTES DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1991, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC. 1991. p. 101 – 108.

ROUSAN, A. A.; ROY, D. M. A thermal comparator method for measuring thermal conductivity of cementitious materials. **Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development**, v. 22, n. 2, p. 349-351, 1983.

SANTA CATARINA. Policia Militar. Corpo de Bombeiros. **Normas de segurança contra incêndio**. – 2. ed. rev. e ampl. – Florianópolis: EDEME, 1992. 144p.

SEITO, A. I. Fundamentos de fogo e incêndio. In: SEITO, A. I. *et al.* (Coord.). **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 35-54.

SILVA, V. P. Considerações sobre as normas brasileiras de estruturas em situação de incêndio. **Revista Incêndio**, n. 46, p. 52-57, 2007.

SILVA, V. P. *et al.* Segurança das estruturas em situação de incêndio. In: SEITO, A. I. *et al.* (Coord.). **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 135-167.

THINK BRICK AUSTRALIA. **Design of clay masonry walls for fire resistance**. Baulkham Hills, 2006. Disponível em <<http://www.thinkbrick.com.au/brick-data.cfm>>. Acesso em: 04 setembro 2008.

THOMAZ, E.; HELENE, P. **Qualidade no projeto e na execução de alvenaria estrutural e de alvenarias de vedação em edifícios**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PCC/252. São Paulo: EPUSP, 2000. 31 p.

VILLAR, F. H. R. **Alternativas de sistemas construtivos para condomínios residenciais horizontais - estudo de caso**. São Carlos, 2005. 139 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

ZSEMBERY, S.; CLARKE, R. E.; MCNEILLY, T. Thermal transmission properties of Australian clay bricks. **Masonry International**. Londres, v. 10, n. 1, p. 30-34, 2006.

APÊNDICES

Apêndice A - Ensaios de caracterização da argamassa.

Tabela 11 - Ensaios de resistência à compressão da argamassa.

Amostra	Área	Carga	Resistência
N°	(mm²)	(N)	(MPa)
1	1963,50	16330	8,32
2	1963,50	12130	6,18
3	1963,50	19430	9,90
4	1963,50	17630	8,98
5	1963,50	10330	5,26
		Média	7,73
		Desvio-Padrão	1,94
		Coef. Variação	25,1%

Apêndice B - Ensaios de caracterização da areia.

Tabela 12 - Ensaio de granulometria da areia.

Abertura da malha	Porc. retida acum.
(mm)	(%)
4,8	1,38
2,4	14,56
1,2	43,23
0,6	71,44
0,3	87,84
0,15	95,18
Fundo	100
Módulo de Finura	3,14
Classificação	Média
Massa Esp. (kg/m ³)	2630
Teor Umidade (%)	12,0

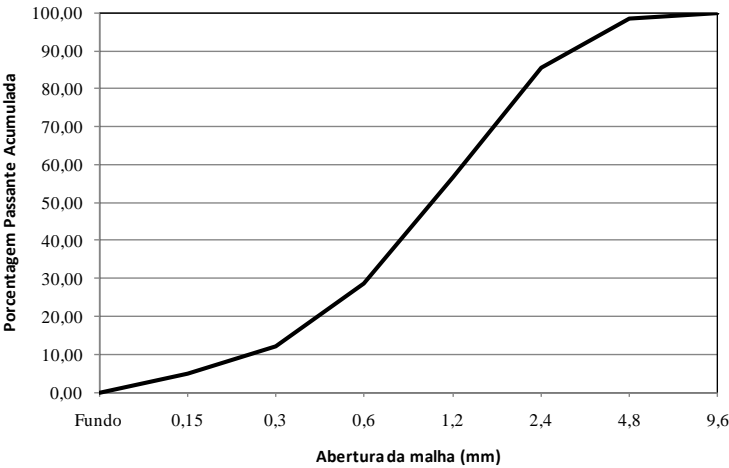


Figura 68 - Curva granulométrica da areia.

Apêndice C - Valores de temperaturas no interior do forno durante os ensaios.

Tabela 13 - Temperaturas no interior do forno durante o ensaio das paredes sem preenchimento.

TEMPO (MIN)	PTO 01 (°C)	PTO 02 (°C)	PTO 03 (°C)	PTO 04 (°C)	PTO 05 (°C)	TEMP MEDIA (°C)	AUMENTO TEMP (°C)
0	20	20	20	21	21	20,4	0,0
5	520	730	514	507	760	606,2	585,8
10	651	830	760	600	985	765,2	744,8
15	749	870	894	683	1041	847,4	827,0
20	747	817	846	918	885	842,6	822,2
25	736	803	857	989	962	869,4	849,0
30	776	818	875	986	947	880,4	860,0
35	789	815	857	990	927	875,6	855,2
40	813	825	879	986	935	887,6	867,2
45	812	835	874	965	962	889,6	869,2
50	932	957	1023	1113	1114	1027,8	1007,4
55	889	909	951	995	1062	961,2	940,8
60	879	896	931	982	1047	947,0	926,6
65	881	899	934	1033	989	947,2	926,8
70	888	913	949	995	1070	963,0	942,6
75	901	937	977	1031	1105	990,2	969,8
80	916	945	992	1007	1111	994,2	973,8
85	921	951	979	1035	1062	989,6	969,2
90	914	938	973	1024	1059	981,6	961,2
95	911	934	960	1030	981	963,2	942,8
100	958	985	1036	1099	1137	1043,0	1022,6
105	963	985	1025	1070	1126	1033,8	1013,4
110	964	976	1010	1091	1028	1013,8	993,4
115	967	979	1013	1077	1059	1019,0	998,6
120	964	973	1005	1088	1059	1017,8	997,4
125	976	986	1024	1104	1052	1028,4	1008,0
130	1013	1037	1076	1114	1195	1087,0	1066,6
135	1037	1057	1087	1132	1188	1100,2	1079,8
140	1043	1060	1090	1128	1191	1102,4	1082,0
145	1039	1054	1092	1120	1189	1098,8	1078,4
150	1040	1057	1092	1126	1182	1099,4	1079,0
155	1039	1053	1089	1124	1143	1089,6	1069,2
160	1041	1052	1085	1115	1186	1095,8	1075,4
165	1040	1052	1082	1123	1130	1085,4	1065,0
170	1037	1052	1076	1102	1136	1080,6	1060,2
175	1034	1047	1072	1110	1105	1073,6	1053,2
180	1043	1059	1092	1126	1170	1098,0	1077,6
185	1061	1074	1109	1135	1196	1115,0	1094,6
190	1067	1078	1110	1150	1145	1110,0	1089,6
195	1071	1082	1109	1144	1153	1111,8	1091,4
200	1072	1080	1112	1134	1147	1109,0	1088,6

Tabela 14 - Temperaturas no interior do forno durante o ensaio das paredes com preenchimento.

TEMPO (MIN)	PTO 01 (°C)	PTO 02 (°C)	PTO 03 (°C)	PTO 04 (°C)	PTO 05 (°C)	TEMP MEDIA (°C)	AUMENTO TEMP (°C)
0	17	17	17	17	17	17,0	0,0
5	564	678	491	517	870	624,0	607,0
10	598	742	541	552	890	664,6	647,6
15	658	799	615	606	1010	737,6	720,6
20	706	837	693	660	1070	793,2	776,2
25	752	878	752	704	1075	832,2	815,2
30	786	914	799	755	1103	871,4	854,4
35	795	905	867	798	1052	883,4	866,4
40	802	915	912	830	1058	903,4	886,4
45	813	911	921	863	1052	912,0	895,0
50	831	910	919	867	1042	913,8	896,8
55	827	896	899	945	1001	913,6	896,6
60	870	934	964	1018	1058	968,8	951,8
65	907	962	965	965	1010	961,8	944,8
70	872	933	958	968	1010	948,2	931,2
75	909	950	980	1017	1020	975,2	958,2
80	917	961	989	1008	1025	980,0	963,0
85	920	969	1001	1015	1085	998,0	981,0
90	961	1003	1046	1075	1077	1032,4	1015,4
95	977	1004	1036	1058	1085	1032,0	1015,0
100	975	1006	1033	1065	1082	1032,2	1015,2
105	972	1001	1029	1061	1056	1023,8	1006,8
110	999	1031	1060	1085	1106	1056,2	1039,2
115	1008	1034	1065	1104	1078	1057,8	1040,8
120	1011	1031	1059	1092	1077	1054,0	1037,0
125	1011	1028	1051	1086	1080	1051,2	1034,2
130	1008	1023	1050	1063	1085	1045,8	1028,8
135	1016	1039	1059	1086	1091	1058,2	1041,2
140	1019	1035	1060	1094	1073	1056,2	1039,2
145	1035	1053	1078	1119	1124	1081,8	1064,8
150	1041	1051	1083	1127	1120	1084,4	1067,4
155	1040	1056	1080	1098	1112	1077,2	1060,2
160	1045	1051	1075	1128	1114	1082,6	1065,6
165	1042	1049	1076	1118	1095	1076,0	1059,0
170	1051	1064	1090	1125	1101	1086,2	1069,2
175	1055	1068	1092	1122	1103	1088,0	1071,0
180	1095	1106	1140	1183	1170	1138,8	1121,8
185	1108	1118	1147	1195	1184	1150,4	1133,4
190	1114	1120	1149	1205	1175	1152,6	1135,6
195	1106	1116	1140	1170	1164	1139,2	1122,2
200	1106	1112	1139	1175	1168	1140,0	1123,0

Tabela 14 (cont.) - Temperaturas no interior do forno durante o ensaio das paredes com preenchimento.

TEMPO (MIN)	PTO 01 (°C)	PTO 02 (°C)	PTO 03 (°C)	PTO 04 (°C)	PTO 05 (°C)	TEMP MEDIA (°C)	AUMENTO TEMP (°C)
205	1103	1116	1139	1154	1161	1134,6	1117,6
210	1100	1103	1125	1166	1137	1126,2	1109,2
215	1093	1100	1119	1138	1138	1117,6	1100,6
220	1090	1097	1117	1148	1122	1114,8	1097,8
225	1102	1108	1130	1160	1147	1129,4	1112,4
230	1102	1114	1134	1146	1167	1132,6	1115,6
235	1104	1114	1135	1157	1149	1131,8	1114,8
240	1106	1115	1133	1150	1151	1131,0	1114,0
245	1104	1112	1134	1155	1133	1127,6	1110,6
250	1106	1116	1140	1158	1148	1133,6	1116,6
255	1121	1127	1157	1188	1175	1153,6	1136,6
260	1130	1138	1171	1173	1183	1159,0	1142,0
265	1129	1139	1162	1175	1160	1153,0	1136,0
270	1129	1138	1164	1172	1176	1155,8	1138,8
275	1128	1133	1161	1167	1171	1152,0	1135,0
280	1136	1143	1161	1181	1172	1158,6	1141,6
285	1133	1142	1156	1182	1160	1154,6	1137,6
290	1131	1140	1156	1174	1158	1151,8	1134,8
295	1148	1152	1177	1193	1183	1170,6	1153,6
300	1149	1154	1174	1199	1174	1170,0	1153,0
305	1175	1182	1207	1243	1240	1209,4	1192,4
310	1178	1177	1206	1239	1223	1204,6	1187,6
315	1172	1173	1190	1225	1189	1189,8	1172,8
320	1164	1162	1175	1222	1182	1181,0	1164,0
325	1165	1169	1185	1211	1190	1184,0	1167,0
330	1182	1189	1212	1247	1225	1211,0	1194,0
335	1189	1183	1203	1234	1213	1204,4	1187,4
340	1174	1177	1186	1235	1211	1196,6	1179,6
345	1167	1168	1183	1215	1204	1187,4	1170,4
350	1175	1171	1201	1248	1204	1199,8	1182,8
355	1170	1164	1177	1244	1174	1185,8	1168,8
360	1182	1189	1213	1244	1268	1219,2	1202,2
365	1184	1174	1193	1262	1211	1204,8	1187,8
370	1172	1165	1180	1243	1180	1188,0	1171,0
375	1166	1168	1183	1220	1225	1192,4	1175,4
380	1158	1154	1168	1217	1166	1172,6	1155,6
385	1150	1148	1159	1203	1171	1166,2	1149,2
390	1150	1142	1160	1202	1158	1162,4	1145,4
395	1140	1132	1143	1187	1150	1150,4	1133,4
400	1124	1124	1133	1158	1135	1134,8	1117,8
405	1115	1116	1135	1153	1185	1140,8	1123,8

Apêndice D - Valores de temperatura na face não exposta das paredes.

Tabela 15 - Temperatura na face não exposta ao fogo da parede sem revestimento e sem preenchimento.

TEMPO (MIN)	PTO 01 (°C)	PTO 02 (°C)	PTO 03 (°C)	PTO 04 (°C)	PTO 05 (°C)	TEMP MEDIA (°C)	AUMENTO TEMP (°C)
0	21	22	21	21	21	21,2	0,0
5	22	22	22	22	22	22,0	0,8
10	22	22	22	22	22	22,0	0,8
15	22	22	22	22	22	22,0	0,8
20	24	26	23	23	26	24,4	3,2
25	27	30	26	26	30	27,8	6,6
30	31	35	29	28	35	31,6	10,4
35	36	42	34	33	42	37,4	16,2
40	41	48	40	38	49	43,2	22,0
45	48	55	47	45	57	50,4	29,2
50	54	63	53	52	65	57,4	36,2
55	60	67	58	57	70	62,4	41,2
60	68	75	66	67	80	71,2	50,0
65	78	86	75	77	94	82,0	60,8
70	89	97	85	89	107	93,4	72,2
75	100	109	96	101	119	105,0	83,8
80	112	117	106	111	128	114,8	93,6
85	124	128	118	123	139	126,4	105,2
90	135	139	131	134	151	138,0	116,8
95	146	150	141	143	162	148,4	127,2
100	155	155	149	150	167	155,2	134,0
105	163	158	156	155	170	160,4	139,2
110	172	171	166	165	183	171,4	150,2

Tabela 16 - Temperatura na face não exposta ao fogo da parede com revestimento e sem preenchimento.

TEMPO (MIN)	PTO 01 (°C)	PTO 02 (°C)	PTO 03 (°C)	PTO 04 (°C)	PTO 05 (°C)	TEMP MEDIA (°C)	AUMENTO TEMP (°C)
0	22	22	22	22	22	22,0	0,0
5	22	22	22	22	22	22,0	0,0
10	22	22	22	22	22	22,0	0,0
15	22	22	22	22	22	22,0	0,0
20	23	23	24	23	22	23,0	1,0
25	28	25	25	23	23	24,8	2,8
30	30	28	26	24	23	26,2	4,2
35	32	33	29	26	24	28,8	6,8
40	35	37	31	27	26	31,2	9,2
45	39	42	35	30	27	34,6	12,6
50	42	45	38	32	29	37,2	15,2
55	45	45	38	34	31	38,6	16,6
60	49	48	44	37	34	42,4	20,4
65	54	51	49	40	38	46,4	24,4
70	58	54	54	44	42	50,4	28,4
75	61	57	59	47	46	54,0	32,0
80	65	59	62	50	50	57,2	35,2
85	69	62	68	53	55	61,4	39,4
90	73	65	73	57	59	65,4	43,4
95	78	69	77	60	64	69,6	47,6
100	80	70	79	61	67	71,4	49,4
105	83	72	82	64	71	74,4	52,4
110	88	76	90	67	77	79,6	57,6
115	97	81	97	70	82	85,4	63,4
120	103	85	103	74	89	90,8	68,8
125	110	89	110	76	94	95,8	73,8
130	110	96	115	79	100	100,0	78,0
135	116	100	120	81	104	104,2	82,2
140	121	105	126	84	110	109,2	87,2
145	127	110	132	87	116	114,4	92,4
150	131	115	137	89	122	118,8	96,8
155	136	120	143	89	129	123,4	101,4
160	141	125	148	93	135	128,4	106,4
165	145	131	154	97	141	133,6	111,6
170	151	136	160	101	148	139,2	117,2
175	156	141	166	106	156	145,0	123,0
180	160	146	171	109	162	149,6	127,6
185	161	149	175	111	165	152,2	130,2
190	165	153	180	114	170	156,4	134,4
195	169	158	185	117	177	161,2	139,2
200	172	162	189	120	180	164,6	142,6

Tabela 17 - Temperatura na face não exposta ao fogo da parede sem revestimento e com preenchimento.

TEMPO (MIN)	PTO 01 (°C)	PTO 02 (°C)	PTO 03 (°C)	PTO 04 (°C)	PTO 05 (°C)	TEMP MEDIA (°C)	AUMENTO TEMP (°C)
0	19	19	19	19	19	19,0	0,0
5	19	19	19	19	19	19,0	0,0
10	19	19	19	19	19	19,0	0,0
15	19	20	19	19	19	19,2	0,2
20	20	20	19	20	19	19,6	0,6
25	20	20	20	20	19	19,8	0,8
30	22	22	20	20	20	20,8	1,8
35	23	26	21	21	22	22,6	3,6
40	26	32	24	23	26	26,2	7,2
45	30	40	27	25	32	30,8	11,8
50	35	49	32	29	42	37,4	18,4
55	39	56	37	32	50	42,8	23,8
60	45	63	43	38	56	49,0	30,0
65	50	67	48	43	61	53,8	34,8
70	56	71	53	49	64	58,6	39,6
75	60	73	57	55	65	62,0	43,0
80	64	74	60	59	65	64,4	45,4
85	66	73	61	63	65	65,6	46,6
90	67	74	62	64	65	66,4	47,4
95	68	74	62	65	66	67,0	48,0
100	68	74	62	65	66	67,0	48,0
105	69	75	62	66	68	68,0	49,0
110	69	75	63	67	69	68,6	49,6
115	70	76	63	68	70	69,4	50,4
120	70	77	64	69	71	70,2	51,2
125	71	77	65	69	72	70,8	51,8
130	72	77	65	70	72	71,2	52,2
135	72	76	64	71	70	70,6	51,6
140	73	76	66	71	72	71,6	52,6
145	73	77	66	69	73	71,6	52,6
150	72	77	66	69	74	71,6	52,6
155	73	79	68	71	77	73,6	54,6
160	74	80	75	75	77	76,2	57,2
165	76	82	77	75	81	78,2	59,2
170	78	84	79	79	83	80,6	61,6
175	79	86	81	80	86	82,4	63,4
180	80	89	82	82	93	85,2	66,2
185	81	95	85	84	103	89,6	70,6
190	82	106	89	87	110	94,8	75,8
195	85	117	96	100	119	103,4	84,4
200	88	127	105	110	124	110,8	91,8

Tabela 17 (cont.) - Temperatura na face não exposta ao fogo da parede sem revestimento e com preenchimento.

TEMPO (MIN)	PTO 01 (°C)	PTO 02 (°C)	PTO 03 (°C)	PTO 04 (°C)	PTO 05 (°C)	TEMP MEDIA (°C)	AUMENTO TEMP (°C)
205	98	134	113	118	130	118,6	99,6
210	108	141	121	127	136	126,6	107,6
215	117	148	126	132	140	132,6	113,6
220	125	154	132	136	144	138,2	119,2
225	130	158	137	142	146	142,6	123,6
230	133	163	142	148	150	147,2	128,2
235	137	168	148	153	154	152,0	133,0
240	144	172	151	155	159	156,2	137,2
245	149	177	154	160	161	160,2	141,2
250	152	181	159	162	163	163,4	144,4
255	155	186	163	167	166	167,4	148,4
260	160	190	166	169	169	170,8	151,8

Tabela 18 - Temperatura na face não exposta ao fogo da parede com revestimento e com preenchimento.

TEMPO (MIN)	PTO 01 (°C)	PTO 02 (°C)	PTO 03 (°C)	PTO 04 (°C)	PTO 05 (°C)	TEMP MEDIA (°C)	AUMENTO TEMP (°C)
0	19	19	19	19	19	19	0
5	19	19	19	19	19	19	0
10	19	19	19	19	19	19	0
15	20	19	20	20	19	19,6	0,6
20	21	20	20	20	20	20,2	1,2
25	22	21	21	21	20	21	2
30	25	22	23	23	20	22,6	3,6
35	29	26	25	27	21	25,6	6,6
40	34	33	28	32	24	30,2	11,2
45	42	45	32	37	28	36,8	17,8
50	48	49	37	43	32	41,8	22,8
55	52	55	41	49	36	46,6	27,6
60	56	60	46	53	41	51,2	32,2
65	58	63	49	59	45	54,8	35,8
70	60	65	54	60	49	57,6	38,6
75	61	65	55	61	52	58,8	39,8
80	62	67	58	62	55	60,8	41,8
85	60	69	58	59	57	60,6	41,6
90	60	66	58	64	57	61	42
95	63	69	61	64	61	63,6	44,6
100	62	70	61	64	62	63,8	44,8
105	64	70	63	64	64	65	46
110	62	70	63	64	64	64,6	45,6
115	64	71	63	64	65	65,4	46,4
120	65	70	64	64	66	65,8	46,8
125	65	70	65	65	65	66	47
130	64	67	63	66	63	64,6	45,6
135	63	69	63	65	65	65	46
140	65	70	65	68	66	66,8	47,8
145	64	68	64	69	64	65,8	46,8
150	67	71	66	72	66	68,4	49,4
155	68	71	67	71	67	68,8	49,8
160	67	72	67	73	66	69	50
165	68	72	68	73	67	69,6	50,6
170	69	72	69	74	68	70,4	51,4
175	69	73	69	74	68	70,6	51,6
180	68	71	69	73	67	69,6	50,6
185	69	73	70	75	70	71,4	52,4
190	70	75	71	75	71	72,4	53,4
195	70	75	72	75	71	72,6	53,6
200	67	72	70	74	69	70,4	51,4

Tabela 18 (cont.) - Temperatura na face não exposta ao fogo da parede com revestimento e com preenchimento.

TEMPO (MIN)	PTO 01 (°C)	PTO 02 (°C)	PTO 03 (°C)	PTO 04 (°C)	PTO 05 (°C)	TEMP MEDIA (°C)	AUMENTO TEMP (°C)
205	65	70	68	72	67	68,4	49,4
210	70	75	72	76	71	72,8	53,8
215	70	75	72	76	72	73	54
220	70	75	72	77	72	73,2	54,2
225	69	74	72	78	70	72,6	53,6
230	71	76	73	78	72	74	55
235	71	76	73	79	72	74,2	55,2
240	69	72	71	79	69	72	53
245	71	76	72	81	71	74,2	55,2
250	72	76	73	83	72	75,2	56,2
255	71	75	73	86	69	74,8	55,8
260	73	75	74	92	70	76,8	57,8
265	73	75	75	98	72	78,6	59,6
270	73	75	74	103	71	79,2	60,2
275	74	76	76	110	72	81,6	62,6
280	75	77	77	116	74	83,8	64,8
285	78	80	78	122	76	86,8	67,8
290	83	82	79	127	75	89,2	70,2
295	86	82	80	131	76	91	72
300	93	84	86	136	78	95,4	76,4
305	98	84	92	139	80	98,6	79,6
310	98	82	94	141	81	99,2	80,2
315	104	87	100	143	86	104	85
320	109	92	105	147	90	108,6	89,6
325	115	102	113	150	98	115,6	96,6
330	117	105	115	151	102	118	99
335	115	107	117	152	105	119,2	100,2
340	122	113	121	155	111	124,4	105,4
345	121	115	121	156	112	125	106
350	121	120	123	157	113	126,8	107,8
355	127	125	126	160	119	131,4	112,4
360	133	133	132	162	127	137,4	118,4
365	133	136	133	164	129	139	120
370	136	141	135	166	133	142,2	123,2
375	141	144	139	168	138	146	127
380	142	148	141	170	140	148,2	129,2
385	144	150	143	171	143	150,2	131,2
390	143	148	143	171	142	149,4	130,4
395	142	148	143	171	144	149,6	130,6
400	150	155	149	174	151	155,8	136,8
405	152	161	152	177	154	159,2	140,2

Apêndice E - Cálculos de espessura equivalente e resistência ao fogo pelo método do BIA.

Parede sem revestimento e sem preenchimento:

$$E_{eq} = E_{eq \text{ bloco}}$$

$$E_{eq} = \%_S \cdot E_{bloco}$$

$$E_{eq} = 48\% \cdot 140\text{mm}$$

$$E_{eq} = 67\text{mm}$$

$$RF = RF_{inf} + 60\text{min} \cdot \frac{E_{eq} - E_{inf}}{E_{sup} - E_{inf}}$$

$$RF = 60\text{min} + 60\text{min} \cdot \frac{67 - 58}{86 - 58}$$

$$RF = 79\text{min}$$

Parede com revestimento e sem preenchimento:

$$E_{eq} = E_{eq \text{ reb1}} + E_{eq \text{ bloco}} + E_{eq \text{ reb2}}$$

$$E_{eq} = E_{reb1} + \%_S \cdot E_{bloco} + f \cdot E_{reb2}$$

$$E_{eq} = 15\text{mm} + 48\% \cdot 140\text{mm} + 0,75 \cdot 15\text{mm}$$

$$E_{eq} = 93\text{mm}$$

$$RF = RF_{inf} + 60\text{min} \cdot \frac{E_{eq} - E_{inf}}{E_{sup} - E_{inf}}$$

$$RF = 120\text{min} + 60\text{min} \cdot \frac{93 - 86}{109 - 86}$$

$$RF = 138\text{min}$$

Parede sem revestimento e com preenchimento:

$$E_{eq} = E_{eq \text{ bloco}}$$

$$E_{eq} = \%_S \cdot E_{bloco}$$

$$E_{eq} = (48\% + 35\%) \cdot 140mm$$

$$E_{eq} = 116mm$$

$$RF = RF_{inf} + 60min \cdot \frac{E_{eq} - E_{inf}}{E_{sup} - E_{inf}}$$

$$RF = 180min + 60min \cdot \frac{116 - 109}{127 - 109}$$

$$RF = 203min$$

Parede com revestimento e com preenchimento:

$$E_{eq} = E_{eq \text{ reb1}} + E_{eq \text{ bloco}} + E_{eq \text{ reb2}}$$

$$E_{eq} = E_{reb1} + \%_S \cdot E_{bloco} + f \cdot E_{reb2}$$

$$E_{eq} = 15mm + (48\% + 35\%) \cdot 140mm + 0,75 \cdot 15mm$$

$$E_{eq} = 142mm$$

$$RF = RF_{inf} + 60min \cdot \frac{E_{eq} - E_{inf}}{E_{sup} - E_{inf}}$$

$$RF = 180min + 60min \cdot \frac{142 - 109}{127 - 109}$$

$$RF = 290min$$